



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAWRichtlinie

Prüfung von mineralischen Weichdichtungen und deren Einbauverfahren im Verkehrswasserbau (RPW)

Ausgabe 2015

EU-Notifizierung

2015/31/D

Notifiziert gemäß der Richtlinie 98/34/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Juni 1998 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der Normen und technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (ABl. L 204 vom 21.07.1998, S. 37), zuletzt geändert durch Artikel 26 Absatz 2 der Verordnung (EU) Nr. 1025/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 (ABl. L 316 vom 14.11.2012, S. 12).

BAW-Merkblätter und -Richtlinien

Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2015

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Vorbemerkung	1
2 Anwendungsbereich	2
3 Grundsätzliche Anforderungen an Dichtungsstoffe	3
4 Prüfverfahren für Weichdichtungsstoffe	3
4.1 Allgemeines	3
4.2 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes	5
4.2.1 Allgemeines	5
4.2.2 Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung	5
4.2.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte	6
4.3 Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit	6
4.3.1 Allgemeines	6
4.3.2 Flügelsonden	6
4.3.3 Taschenpenetrometer	8
4.3.4 Versuchsauswertung und Grenzwerte	8
4.4 Zerfallstest nach Endell	10
4.4.1 Allgemeines	10
4.4.2 Versuchsaufbau und -durchführung	10
4.4.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte	11
4.5 Erosionstest (Pinhole-Test)	12
4.5.1 Allgemeines	12
4.5.2 Versuchsaufbau und -durchführung	12
4.5.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte	13
4.6 Flexibilitätstest (Balkenbiegetest)	14
4.6.1 Allgemeines	14
4.6.2 Versuchsaufbau und -durchführung	14
4.6.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte	15
4.7 Ausspülttest	16
4.7.1 Allgemeines	16
4.7.2 Versuchsaufbau und -durchführung	16
4.7.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte	17
4.8 Turbulenztest	18
4.8.1 Allgemeines	18
4.8.2 Versuchsaufbau und -durchführung	18
4.8.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte	20
4.9 Durchschlagtest	20
4.9.1 Allgemeines	20
4.9.2 Versuchsaufbau und -durchführung	21
4.9.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte	24
4.10 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes der GTD bei Dehnung	24
4.11 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes der GTD in Überlappungsbereichen	25

4.11.1	Allgemeines	25
4.11.2	Versuchsaufbau und -durchführung	25
4.11.3	Versuchsauswertung und Grenzwerte	26
5	Grundsätzliche Eignung der Unterwasser-Einbauverfahren	26
5.1	Anforderungen an die Einbauverfahren	26
5.1.1	Allgemeines	26
5.1.2	Naturtondichtungen	27
5.1.3	Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD)	27
5.1.4	Dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln	28
5.2	Nachweis der grundsätzlichen Eignung von Einbauverfahren	29
5.2.1	Allgemeines	29
5.2.2	Naturtondichtungen	29
5.2.3	Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD)	30
5.2.4	Dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln	30
6	Prüfungen für Einbauverfahren gemäß ZTV-W, LB 210	30
7	Literatur	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erforderliche Fallenergien für den Durchschlagtest	23
------------	--	----

Bildverzeichnis

Bild 1:	Laborflügelsonde mit Drehflügel	7
Bild 2:	Handflügelsonde	7
Bild 3:	Mindestgröße des Proben-behälters bei gegebenem Durchmesser des Drehflügels	8
Bild 4:	Taschenpenetrometer mit verschiedenen Adaptern	8
Bild 5:	Beispielhafte grafische Darstellung der Abhängigkeit $c_u = f(w)$ für einen Naturton	9
Bild 6:	Versuchsapparatur zur Ermittlung der Zerfallsbeständigkeit, links: automatische Messwerterfassung, rechts: Aräometermessung	10
Bild 7:	Versuchsapparatur Pinhole-Test	12
Bild 8:	Ergebnis eines Pinhole-Tests (1) – Durchflusskanal ohne nachteilige Veränderungen – Grenzwert eingehalten	13
Bild 9:	Ergebnis eines Pinhole-Tests (2) – Durchflusskanal mit starken Veränderungen – Grenzwert nicht eingehalten	13
Bild 10:	Aufbau der Messapparatur – maßstäbliche Skizze	14

Bild 11:	Aufbau der Messapparatur (ohne Druckkissen) – Foto	15
Bild 12:	Materialprobe nach 20 mm Verformung: unzulässige Rissbildung	16
Bild 13:	Prüfgerät für den Ausspültest (Zeichnerische Darstellung)	17
Bild 14:	Prüfgerät nach RPG für die Bestimmung der Erosionsstabilität einer GTD (Zeichnerische Darstellung)	19
Bild 15:	Prüfgerät zur Bestimmung des Durchschlagwiderstandes nach RPG (Zeichnerische Darstellung)	22
Bild 16:	Schneide des Fallbären und Ort der Probenentnahme im Bereich des geringsten Verrundungsradius des Fallbären	24
Bild 17:	Versuchsapparatur zur Prüfung der Durchlässigkeit von GTD-Überlappungsbereichen (Zeichnerische Darstellung)	26

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Übersicht – Prüfverfahren für Dichtungsstoffe	33
Anlage 2:	Übersicht – Einzuhaltende Grenzwerte für Dichtungsstoffe	34
Anlage 3:	Übersicht – Im Rahmen des Nachweises der grundsätzlichen Eignung zu ermittelnde Materialkennwerte	35
Anlage 4:	Musterzertifikat für die Bestätigung über den Nachweis der grundsätzlichen Eignung eines Verfahrens zum maschinellen Einbau von Weichdichtungen in Bundeswasserstraßen	36

1 Vorbemerkung

Die vorliegenden Richtlinien (RPW) gelten für die Prüfung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von mineralischen Weichdichtungen (Naturtondichtungen, Geosynthetische Tondichtungsbahnen und dauerplastischen Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln) und deren Einbauverfahren in Wasserstraßen, die in der Regel unter Wasser bei laufender Schifffahrt anzuwenden sind.

Entsprechende Richtlinien existieren bereits für die Prüfung von hydraulisch- und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (RPV [9]) und für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG [10]). Zusammen mit den Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW [12]) und Geotextilien (TLG [17]) sowie den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W, LB 210 [1]) bilden sie die Grundlage für die Ausschreibung und Ausführung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen.

Weichdichtungen stellen den Hauptteil der heute angewendeten Oberflächendichtungen im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Insbesondere in den letzten Jahren wurde eine Reihe neuer Dichtungsmaterialien und Einbauverfahren entwickelt, die zum Teil bisher nicht genormte Prüfverfahren erfordern. Zur Vereinheitlichung der Prüfstandards war es notwendig, die für diese Dichtungen erforderlichen, teilweise genormten und teilweise von der BAW für die speziellen Belange an der Wasserstraße entwickelten Prüfverfahren in einer eigenen Richtlinie zusammenzustellen. Für andere Dichtungen (Betondichtungen, Dichtungen aus vollvergossenen Wasserbausteinen und Asphaltdichtungen) existieren bereits entsprechende Normen und Regelwerke (z. B. EAAW [3]).

Die vorliegende Richtlinie behandelt Dichtungsstoffe und deren Einbauverfahren. Die Kapitel 3 und 4 beinhalten zunächst die Anforderungen und Prüfverfahren hinsichtlich der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von mineralischen Weichdichtungsstoffen, mit denen deren grundsätzliche Eignung für Anwendungen im Verkehrswasserbau oder deren Verwendbarkeit gemäß Verwendungszweck nach Baubeschreibung (ZTV-W, LB 210 [1]) nachgewiesen werden kann. Für bereits genormte bodenmechanische Standardversuche werden die einzuhaltenden Grenzwerte definiert, und es wird ggf. auf die besonderen stoffspezifischen Randbedingungen der Versuche hingewiesen. Bei den nicht genormten Prüfverfahren werden im Sinne einer Prüfvorschrift die zu prüfenden Kenngrößen, der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die einzuhaltenden Grenzwerten detailliert beschrieben. Alle bauvertraglich relevanten Grenzwerte sind zusätzlich in den ZTV-W, LB 210 [1] verankert.

Im Kapitel 5 werden grundsätzliche Anforderungen an die Unterwasser-Einbauverfahren für die mineralische Weichdichtungen im Verkehrswasserbau definiert (Kapitel 5.1). Die Erfüllung dieser Anforderungen muss für jedes Verfahren durch eine Grundprüfung bereits im Vorfeld unabhängig von jeder Baumaßnahme nachgewiesen werden (ZTV-W, LB 210 [1]). Randbedingungen und Anforderungen für die Durchführung dieser Grundprüfungen sind im Kapitel 5.2 zusammengestellt. Sinngemäß sind diese Anforderungen auch auf andere Verwendbarkeitsnachweise (z. B. Prüfung im Einzelfall) anwendbar.

Im Kapitel 6 wird informativ kurz auf die im Rahmen der Baumaßnahme durchzuführenden Eignungs-, Kontroll- und Eigenüberwachungsprüfungen eingegangen. Die Anforderungen und Details dazu sind in den ZTV-W, LB 210 [1] verankert.

Da die Entwicklung von Dichtungsstoffen und Einbauverfahren ständig fortschreitet, ist vorgesehen, diese Richtlinien in Abständen zu aktualisieren. Außerdem ist es erforderlich, mit den neu entwickelten Prüfverfahren und den festgelegten Grenzwerten in der praktischen Anwendung Erfahrungen zu sammeln und diese in weitere Überarbeitungen einfließen zu lassen. Die jeweils aktuelle Fassung steht über die Internetseite der BAW (www.baw.de) zur Verfügung.

Allgemeine fachspezifische Grundlagen für die Anwendung von Dichtungen in Wasserstraßen beinhalten die 2002 herausgegebenen „Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Wasserstraßen“ (EAO) [2], abrufbar auf der Internetseite der BAW.

Produkte und Ursprungswaren aus anderen Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder der Türkei oder einem EFTA-Staat, der Vertragspartei des EWR-Abkommens ist, die diesen technischen Spezifikationen nicht entsprechen, werden einschließlich der im Herstellerstaat durchgeführten Prüfungen und Überwachungen als gleichwertig behandelt, wenn mit ihnen das geforderte Schutzniveau – Sicherheit, Gesundheit und Gebrauchstauglichkeit – gleichermaßen dauerhaft erreicht wird.

2 Anwendungsbereich

Behandelt werden Prüfverfahren für folgende mineralische Weichdichtungen und deren Einbauverfahren:

- Naturtondichtungen,
- Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD bzw. GBR-C nach DIN-EN ISO 10318 [16]),
- Dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln.

Naturton ist ein seit langem bewährter Dichtungsstoff. Es ist ein feinkörniger Erdstoff, der in der Regel aufbereitet werden muss, um die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen.

Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD) bestehen aus zwei Lagen Geotextilien, zwischen denen eine Schicht Bentonit eingeschlossen ist. Es gibt neben den reinen Dichtungsbahnen auch Kombinationsprodukte, bei denen die GTD mit einer darüber liegenden Sandmatte fest verbunden ist. GTD werden im Deponiebau schon länger eingesetzt. In der Wasserstraße gehören sie noch zu den neuen Dichtungen, hier haben sie sich noch nicht als Regelbauweise etablieren können.

Eine *dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln* ist ein Gemisch aus Sand, Wasser und einem speziellen Compound, das nicht aushärtet. Durch eine hochtourige Aufbereitung in einem Zwangsmischer wird eine große Erosionsstabilität erreicht. Das Compound besteht aus Tonmineralien, Zement und Additiven. Die Zementmenge ist so gering bemessen, dass die Mischung im Sinne einer Weichdichtung dauerhaft flexibel bleibt. In der Wasserstraße gehören sie noch zu den neuen Dichtungen, hier haben sie sich noch nicht als Regelbauweise etablieren können.

Ausführliche Informationen zu den einzelnen Dichtungen enthalten die Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen (EAO [2]).

3 Grundsätzliche Anforderungen an Dichtungsstoffe

Die wichtigsten Anforderungen an Weichdichtungen beim Einsatz in Wasserstraßen, für die in den vorliegenden Richtlinien Prüfverfahren beschrieben werden, sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

Ausreichende Dichtigkeit durch geringe Durchlässigkeit bzw. geringe Permittivität

Die Wirksamkeit einer Dichtung kann an der pro Zeiteinheit durchtretenden Wassermenge beurteilt werden. Diese wird von den hydraulischen Randbedingungen (Wasserstand über der Dichtung), dem Durchlässigkeitsbeiwert des Dichtungsmaterials und der Schichtdicke der Dichtung bestimmt.

Erosionssicherheit (innere und äußere Erosion)

Das Dichtungsmaterial muss bei den in der Dichtung auftretenden hydraulischen Gefällen erosionsstabil sein (innere Erosion). Mögliche Fehlstellen in der Dichtung dürfen sich bei Durchströmung nicht aufweiten (äußere Erosion). An der Unterseite der Dichtung darf keine Erosion von Dichtungsmaterial auftreten (äußere Erosion). Die Erosionsbeanspruchung durch strömendes Wasser an der Oberfläche der Dichtung beim Einbau darf zu keiner Schwächung der Dichtung führen. Im Dauerbetrieb müssen die Dichtungsoberflächen den vorhandenen hydraulischen Beanspruchungen widerstehen oder geschützt werden.

Verformbarkeit

Dichtungen dürfen durch Verformungen des Untergrundes oder von Bauteilen, die mit der Dichtung in Kontakt sind, in ihrer Funktion nicht nachteilig beeinflusst werden. Daher müssen Dichtungen eine ausreichende Verformbarkeit aufweisen.

Festigkeit

Dichtungen müssen andererseits auch eine ausreichende Festigkeit besitzen, um bei mechanischen Belastungen keine Beeinträchtigung ihrer Funktionsfähigkeit zu erleiden. Mechanische Beanspruchungen können beispielsweise planmäßig beim Einbau der Dichtung und der darüber liegenden Schutzschichten auftreten. Scherbeanspruchungen der Dichtung können auf Böschungen auftreten.

Langzeitbeständigkeit

Dichtungen dürfen während der geplanten Lebensdauer ihre Eigenschaften nicht in einer für ihre Funktionsfähigkeit negativen Weise verändern.

4 Prüfverfahren für Weichdichtungsstoffe

4.1 Allgemeines

In Anlage 1 sind in einer tabellarischen Übersicht die entsprechend den Anforderungen nach Punkt 3 für die einzelnen Dichtungsstoffe durchzuführenden Prüfverfahren zusammengestellt. Ein Verweis auf die einzelnen Abschnitte im Text wird gegeben. Anlage 2 zeigt eine Zusammenstellung der dabei jeweils einzuhaltenden Grenzwerte. Der Anlage 3 ist zu entnehmen, welche Kennwerte bzw. Prüfungen insgesamt für die einzelnen Dichtungsmaterialien im Rahmen der Prüfung zum Nachweis der grundsätzlichen Eignung zu ermitteln bzw. durchzuführen sind.

Zusätzlich zu den Prüfungen entsprechend Anlage 1 sind für die einzelnen Dichtungsstoffe je nach Anwendungsfall und Prüfungsart zum Teil weitere Materialkennwerte zu bestimmen. Auf die weitgehend genormten Prüfverfahren wird im Weiteren nicht näher eingegangen.

Für *Naturton* sind das folgende Materialkennwerte:

- Korngrößenverteilung (DIN 18123)
Anforderungen:
Kornanteil $d_{20} \leq 0,002$ mm (Trockeneinbau)
Kornanteil $d_{30} \leq 0,002$ mm (Unterwassereinbau)
Kornanteil $d_{80} \leq 0,06$ mm
Kornanteil $d_{90} \leq 2,0$ mm
- Konsistenzgrenzen (DIN 18122)
Anforderungen: $W_L > 0,35$, im Plastizitätsdiagramm der DIN 18196 oberhalb der A-Linie
- Kalkgehalt (DIN 18129) – Indexwert
- Glühverlust (DIN 18128) – Indexwert
- Wassergehalt (DIN 18121) und Proctordichte (DIN 18127)
Anforderung: ergibt sich aus Anforderung an die undrained Scherfestigkeit (siehe Kap. 4.3)
- Wasseraufnahme (DIN 18132) – Indexwert
- Mineralogische Zusammensetzung – Indexwert

Für die *GTD* gelten sinngemäß zusätzlich die RPG [10]. Nach DIN EN 13362 [15] können dementsprechend je nach Anwendungsfall und Prüfungsart folgende Kennwerte relevant sein:

- Flächenbezogene Masse (DIN EN 14196) – ggf. mit Sandmatte –
- Zugfestigkeit/Dehnung (DIN EN ISO 10319)
Anforderung: ≥ 12 kN/m
- Wasseraufnahme (DIN EN ISO 10769 / DIN 18132) – Indexwert
- Verbundfestigkeit (DIN EN ISO 13426-2)
- Anforderung aufgrund bisheriger Erfahrungen: 60N / 10 cm
- Abriebbeständigkeit (RPG) bei Anwendung mit Wasserbausteinen oder ohne Schutzschicht
- Durchdrückwiderstand (EN ISO 12236) – Indexwert

Die Anforderungen an die Zugfestigkeit müssen auch von allen Einzellagen der GTD erfüllt werden, d.h. der erste Peak der Kraft-Dehnungskurve (siehe DIN EN ISO 10319, Bild 1) und damit das Versagen der ersten Geotextilkomponente ist das Bewertungskriterium für die Zugfestigkeit der GTD.

Der Nachweis einer ausreichenden Reibung ist bei Anwendung der GTD auf Böschungen mit Neigungen steiler als 1:3 in Abhängigkeit vom anstehenden Boden und vorgesehenen Deckwerksaufbau zu führen.

Für eine *dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln* ist zusätzlich das

- Ausbreitmaß (DIN EN 12350-5) – Indextest

zu bestimmen. Es dient in den Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen als zusätzliche Kontrollgröße für den Nachweis der Konstanz der gewählten Rezeptur.

4.2 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes

4.2.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Dichtungen aus Naturton, dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln sowie GTD.

4.2.2 Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10} wird nach der DIN 18130, Teil 1 bestimmt. Der Wert errechnet sich aus dem gemessenen Durchfluss bei konstantem hydraulischem Gefälle nach folgender Gleichung:

$$k_{10} = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h} \quad (1)$$

k_{10} Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bei 10°C Wassertemperatur [m/s]

Q gemessener Durchfluss [m³/s]

A Querschnittsfläche der Probe [m²]

h hydraulischer Höhenunterschied [m]

l durchströmte Länge (Schichtdicke der Probe) [m]

Die Permittivität ψ ist unabhängig von der Schichtdicke der Dichtung und wird nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\psi_{10} = \frac{Q}{A \cdot h} = \frac{k}{l} \quad (2)$$

ψ_{10} Permittivität bei 10°C Wassertemperatur [1/s]

Der hydraulische Höhenunterschied h bzw. das hydraulische Gefälle i ($i = h/l$) im Versuch ist entsprechend der in der praktischen Anwendung an Wasserstraßen vorgesehenen Druckhöhe zu wählen. Bei Tondichtungen und dauerplastischen Dichtungen mit hydraulischen Bindemitteln und Ton erfolgt der Versuch in der Regel bei einem Gefälle von 30. Bei den GTD sollten den üblichen Randbedingungen an Wasserstraßen entsprechend Wassersäulen über der Dichtung von 5 m und 1 m berücksichtigt werden. Der größere ermittelte k_{10} -Wert ist maßgebend.

Bei der Untersuchung von GTD-Proben ist sicherzustellen, dass diese im Versuch ungestört bleiben. Mögliche Veränderungen in der Oberflächenstruktur – wie beispielsweise lokale Eindrücke durch Wasserbausteine – dürfen durch Aufbringen von Auflasten oder sonstigen Drücken im Versuch nicht beseitigt werden. Deshalb ist die Probe vorsichtig beidseitig in ein Polster aus gleichkörnigem Sand oder Feinkies zu legen, so dass diese Stellen hydraulisch wirksam bleiben.

4.2.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Im Versuch wird der Durchfluss bei einer bestimmten Höhe der Wassersäule gemessen. Die Berechnung der Durchlässigkeitsparameter k_{10} bzw. ψ_{10} erfolgt daher als Mittelwert für die gesamte Probe. Zur Berechnung des Gradienten i und des Durchlässigkeitsbeiwertes wird für GTD üblicherweise die planmäßige Dicke von i. d. R. 1 cm angenommen, da eine genaue Bestimmung schwierig ist, insbesondere wenn die Matte von vornherein Dickenschwankungen aufweist oder durch Beanspruchung verformte Probekörper untersucht werden.

Der zulässige Grenzwert ergibt sich aus der nach ZTV-W, LB 210 [1] maximal zulässigen Sickerwassermenge von $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$. Für Tondichtungen und dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln mit einer Mindestdicke von 20 cm wird ein k_{10} -Wert von maximal $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, für GTD mit einer planmäßigen Dicke von 1 cm maximal $5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ gefordert. Für den Nachweis im Gebrauchszustand, z. B. für Proben, die aus verlegten Dichtungen entnommen wurden, ist eine Erhöhung der zugelassenen Sickerwassermenge um maximal eine Zehnerpotenz zulässig. Ein Vergleich verschiedener Dichtungen mit unterschiedlichen Dicken ist über die Permittivität möglich, die unabhängig von der Schichtdicke aus den Versuchen ermittelt werden kann.

4.3 Bestimmung der undrännierten Scherfestigkeit

4.3.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Naturtondichtungen und dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln.

Die undrännierte Scherfestigkeit c_u kann auf unterschiedliche Art und Weise ermittelt werden: Für Messungen vor Ort, z. B. bei baubegleitenden Kontrollmessungen, eignen sich die Hand- und Feldflügelsonde sowie das Taschenpenetrometer. Für Untersuchungen im Labor, z. B. im Zuge von Grundprüfungen oder bei Kontrollprüfungen an aus der Dichtung entnommenen Proben, wird die undrännierte Scherfestigkeit mittels Laborflügelsonde oder anhand von Triaxialversuchen bestimmt.

Die Durchführung und Auswertung von Feldflügelsondierungen sind in der DIN 4094, Teil 4 [6] geregelt. Für die Labor- und Handflügelsonde existieren dagegen keine entsprechenden Normen. Bei Einhaltung der in [6] verankerten Randbedingungen (geringe Drehgeschwindigkeit und Flügelverhältnis $h/d = 2$) sind die Ergebnisse der Untersuchungsmethoden im Rahmen der erzielbaren baupraktischen Genauigkeit jedoch vergleichbar.

Mit der Laborflügelsonde und dem Taschenpenetrometer werden geringere Probenvolumina geprüft als mit der Hand- und Feldflügelsonde. Für repräsentative Scherfestigkeitsangaben sind daher mit der Laborflügelsonde und dem Taschenpenetrometer mindestens 5 Einzelmessungen, mit der Hand- und Feldflügelsonde mindestens 3 Einzelmessungen pro Versuch durchzuführen. Mit dem Taschenpenetrometer wird i. A. eine geringere Messgenauigkeit erreicht als mit den Flügelsonden.

4.3.2 Flügelsonden

Bei Prüfungen mit der Labor- (Bild 1), Hand- (Bild 2) oder Feldflügelsonde wird das maximal über den Flügel in den Boden einleitbare Drehmoment ($\max M_D$) ermittelt. Aus diesem wird die undrännierte Scherfestigkeit des Bodens berechnet (Kap. 4.3.4).

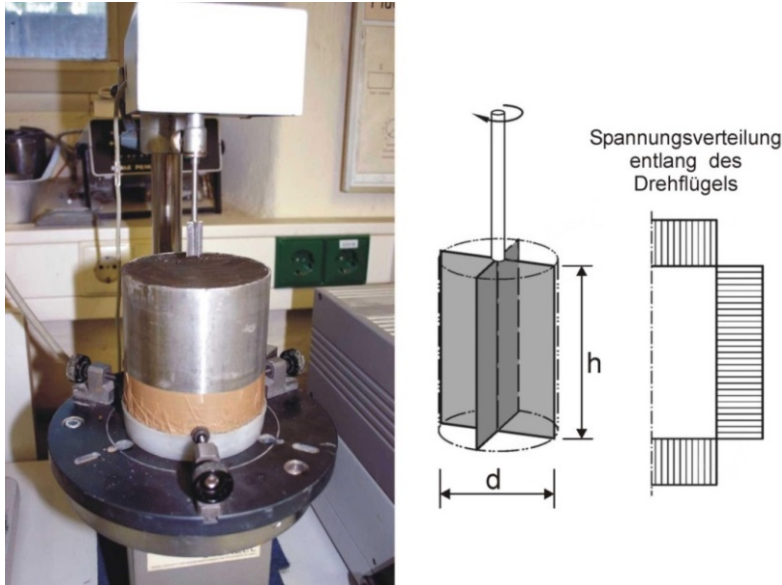


Bild 1: Laborflügelsonde mit Drehflügel



Bild 2: Handflügelsonde

Bei der Durchführung der Flügelsondierungen sind die Abmessungen und geometrischen Verhältnisse zwischen Drehflügel und Probenbehälter entsprechend Bild 3 einzuhalten. Das standardisierte Verhältnis von Höhe zum Durchmesser des Drehflügels beträgt $h/d = 2$.

Bei der Laborflügelsonde wird ein Flügel mit $h = 2,5$ cm und $d = 1,25$ cm verwendet. Die Drehgeschwindigkeit beträgt $6^\circ/\text{min}$. Die Abmessungen der Handflügelsonde betragen $h = 5,08$ cm und $d = 2,54$ cm. Die Flügelsonden werden entsprechend den Vorgaben in Bild 3 in den Boden gedrückt und im Uhrzeigersinn gedreht. Für die Drehgeschwindigkeit gibt es keine konkreten Vorgaben, die Drehung sollte sehr langsam erfolgen. Nach Erreichen des maximalen Drehmomentes ist der Versuch beendet.

Bei der Handflügelsonde wird das Drehmoment über einen Schleppzeiger aufgenommen, der bei Überschreiten des Bruchmomentes nicht mehr weiter ansteigt. Das maximale Moment kann an einer fest stehenden Markierung abgelesen werden. Die undrained Scherfestigkeit ergibt sich aus dem gemessenen Drehmoment nach Gleichung 3 bzw. 4.

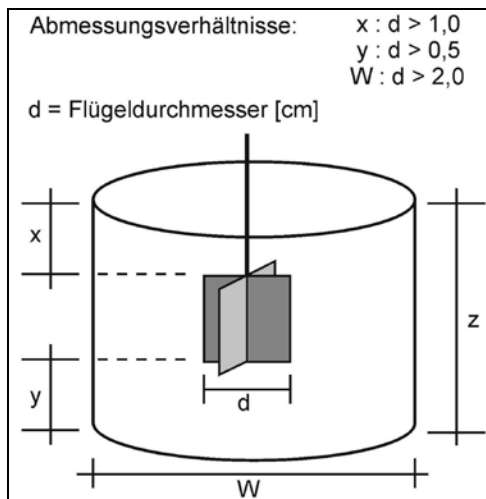


Bild 3: Mindestgröße des Probenbehälters bei gegebenem Durchmesser des Drehflügels

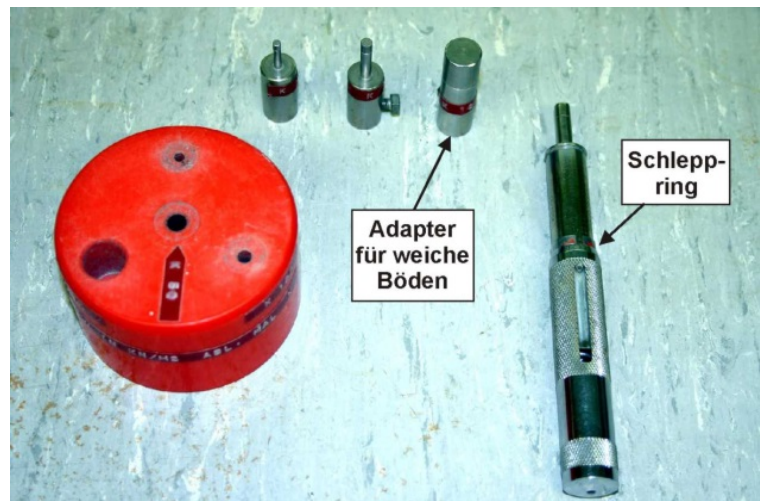


Bild 4: Taschenpenetrometer mit verschiedenen Adaptern

4.3.3 Taschenpenetrometer

Ein Schnellversuch zur Bestimmung der undrännierten Scherfestigkeit wird mit dem Taschenpenetrometer durchgeführt (Bild 4). Dabei wird das Penetrometer langsam und mit leichtem Druck gegen den Bodenwiderstand und den Federwiderstand des Penetrometers senkrecht in die Probe eingedrückt. Über einen Schleppring wird die hierzu benötigte Kraft an einer Messskala am Penetrometer angezeigt. In Abhängigkeit vom verwendeten Adapter (Aufsatzspitze) wird diese Kraft in eine Spannung bzw. Festigkeitsangabe umgerechnet. Bei den im Dichtungsbau zu untersuchenden Festigkeiten wird i. A. ein Adapter für weiche Böden verwendet.

4.3.4 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Bei den Flügelsondierungen wird aus dem gemessenen maximalen Drehmoment $\max M_D$ die undrännierte Scherfestigkeit c_u wie folgt berechnet:

$$c_u = \frac{\max M_D}{\frac{\pi}{2} \cdot d^2 \cdot h(1 + (d + 3h))} \quad (3)$$

H Höhe des Flügels [m]

d Durchmesser des Flügels [m]

$\max M_D$ maximales Drehmoment [Nm]

c_u undrännierte Scherfestigkeit [$\text{N/m}^2 = 10^{-3} \text{ kPa}$]

Dabei wird entsprechend DIN 4094-4 [6] entlang des Drehflügels eine rechteckige Spannungsverteilung angenommen. Für das vorgegebene Seitenverhältnis des Flügels von $h/d = 2$ ergibt sich damit:

$$c_u = \frac{6 \cdot \max M_D}{7 \cdot \pi \cdot d^3} \quad (4)$$

Eine Abminderung der ermittelten Scherfestigkeit entsprechend Anlage C der DIN 4094-4 [6] ist für Weichdichtungen nicht zulässig.

Da die undrained Scherfestigkeit stark vom Wassergehalt abhängig ist, wird bei Naturtondichtungen im Zuge der Grundprüfung die bodenspezifische Kennlinie des Dichtungsmaterials $c_u = f(w)$ ermittelt. Die undrained Scherfestigkeit c_u wird dazu bei verschiedenen Wassergehalten w mit der Laborflügelsonde bestimmt. Aus der grafischen Darstellung (Bild 5) können die Wassergehalte an den in der ZTV-W, LB 210 [1] geforderten Einbaugrenzen

für den Unterwassereinbau: $15 \text{ kPa} \leq c_u \leq 25 \text{ kPa}$

für den Einbau im Trocken: $c_u \leq 50 \text{ kPa}$

abgelesen werden.

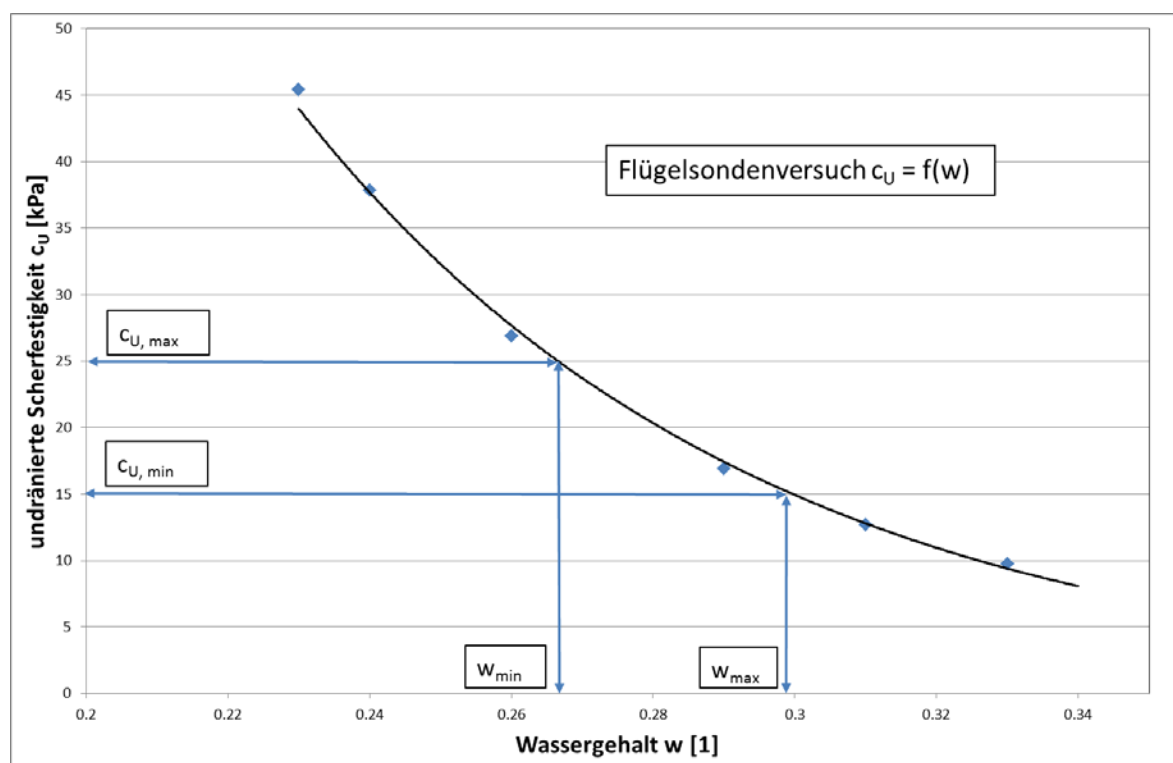


Bild 5: Beispielhafte grafische Darstellung der Abhängigkeit $c_u = f(w)$ für einen Naturton

Die Grenzwassergehalte w_{min} und w_{max} (siehe Bild 5) geben einen Hinweis darauf, wie viel Wasser dem natürlich gewonnenen Tonmaterial im Zuge der Aufbereitung und Homogenisierung zugegeben oder entzogen werden muss, um die o. g. Einbaufestigkeiten zu erreichen. Bei sensiblen Tonmaterialien können sich durch unterschiedliche Aufbereitung unterschiedliche Kennlinien $c_u = f(w)$ für den Zustand vor und nach der Aufbereitung des Materials ergeben. Entscheidendes Einbaukriterium ist deshalb die Festigkeit und nicht der Wassergehalt.

Für dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln sind die einzuhaltenden Grenzwerte der Einbaufestigkeit entsprechend der geforderten Materialeigenschaften in der Grund- bzw. Eignungsprüfung festzulegen.

4.4 Zerfallstest nach Endell

4.4.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Naturtondichtungen.

In dem von ENDELL [13] entwickelten Versuch zur Bestimmung der Zerfallsziffer wird die Beständigkeit eines Probenkörpers bei Wasserlagerung geprüft. Mit diesem Verfahren ist es möglich, den Zerfall bzw. das Quellen bindiger Böden nach Art und Geschwindigkeit qualitativ zu beurteilen. Dichtungsmaterialien mit erhöhtem Zerfall sind stärker erosionsanfällig. Dies stellt besonders im Bauzustand eine Gefährdung der noch ungeschützten Dichtung dar. In Verbindung mit dem Ergebnis des Pinhole-Tests (Punkt 4.5.3) dient die Ermittlung der Zerfallsziffer zur qualitativen Beurteilung der Erosionsanfälligkeit eines Dichtungstoffes.

4.4.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Ermittlung der Zerfallsbeständigkeit erfolgt mit der rechts im Bild 6 dargestellten Versuchsanordnung. Ein Messzylinder von 60 cm Höhe und 7 cm Durchmesser wird fast bis zum Rand mit destilliertem Wasser gefüllt, darin wird ein Aräometer von 50 cm Länge und 2 cm Durchmesser eingetaucht. Das Aräometer mit einer Messskala ist unten mit Bleikugeln beschwert, damit eine stabile Schwimmlage erreicht wird. An dem unteren Ende des Aräometers ist ein aus Drähten gefertigter Korb befestigt, in dem sich der zylindrische Probenkörper (Durchmesser $d = 2$ cm, Höhe $h = 4$ cm) befindet. Wird das Aräometer mit der Bodenprobe in den mit Wasser gefüllten Messzylinder gegeben, ergibt sich aufgrund der Wasserverdrängung, des Gewichtes des Aräometers und der Bodenprobe eine bestimmte Eintauchtiefe, die durch die Ablesung A_1 bei Versuchsbeginn zu protokollieren ist. Während der Versuchsdurchführung ist auf eine weitestgehende Temperaturkonstanz der Messumgebung zu achten.

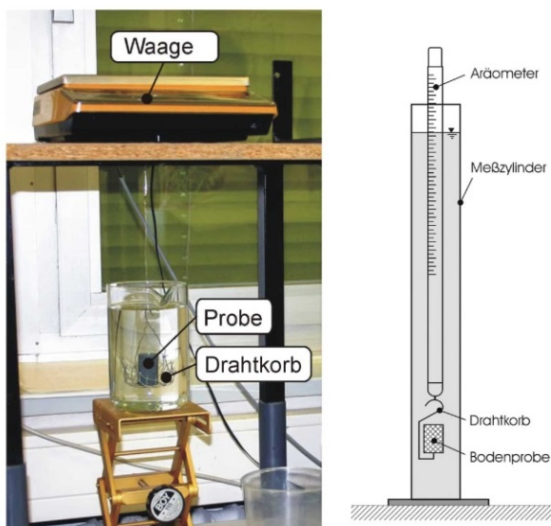


Bild 6: Versuchsanordnung zur Ermittlung der Zerfallsbeständigkeit, links: automatische Messwerterfassung, rechts: Aräometermessung

Durch den gegebenenfalls einsetzenden Zerfall der Bodenprobe mit nachfolgendem Absinken von Bodenpartikeln im Messzylinder tritt eine Gewichtsabnahme des Probenkörpers ein. Das Aräometer bewegt sich dabei langsam nach oben und verringert allmählich seine Eintauchtiefe. Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Eintauchtiefen (Ablesungen $A(t)$) werden bis zur Auftriebskonstanz, jedoch

mindestens bis 24 Stunden nach Versuchsbeginn protokolliert. Am Ende des Versuchs wird die Eintauchtiefe des Aräometers ohne Probenkörper inklusive Drahtkorb festgestellt (Ablesung A2).

Die Versuchseinrichtung wurde in der BAW weiterentwickelt und mit automatischer Messwerterfassung ausgestattet (links im Bild 6). Dabei wird der Probenkörper in einem grobmaschigen Drahtkorb in einen Wasserbehälter eingetaucht. Der Korb wird an eine Feinwaage mit 0,01 g Messgenauigkeit angehängt und das Ausgangsgewicht unter Auftrieb protokolliert. Analog zur Ablesung des Aräometers wird in verschiedenen Zeitabständen das Auftriebsgewicht der auf dem Drahtkorb verbliebenen Restprobenmenge gemessen. Die Dokumentation der Ablesungszeitpunkte, die Messwerterfassung und die Auswertung erfolgt automatisiert.

4.4.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Die Auswertung der Messwerte und die Berechnung der Zerfallsziffer Z erfolgt über eine einfache Verhältnisgleichung. Hierbei sind:

$$Z = \frac{A1 - A(t)}{A1 - A2} \quad (5)$$

Z Zerfallsziffer [-]

A1 Eintauchtiefe des Aräometers [mm] bzw. Auftriebsgewicht des Probekörpers inklusive Drahtkorb [g] bei Versuchsbeginn

A(t) Eintauchtiefe des Aräometers [mm] bzw. Auftriebsgewicht des Probekörpers inklusive Drahtkorb [g] zum Zeitpunkt t nach Versuchsbeginn

A2 Eintauchtiefe des Aräometers [mm] bzw. Auftriebsgewicht des Drahtkorbs ohne Probenkörper [g]

Qualitative Aussagen zum zeitlichen Verlauf des Zerfalls können aus einer grafischen Darstellung der Wertepaare Z und t in der Form $Z = f(t)$ abgeleitet werden.

Das Versuchsergebnis ergibt zu niedrige Zerfallsziffern, wenn die sich ablösenden Erdstoffpartikel nicht auf den Boden des Wasserbehälters absinken, sondern auf dem Drahtgeflecht verbleiben. In diesem Fall kann das Ergebnis nicht gewertet werden, der Versuch ist zu wiederholen.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Zerfallsbeständigkeit unterschiedlicher Dichtungsproben wird die Zerfallsziffer nach 8 Stunden Versuchsdauer (Z(8)) herangezogen. Nach Endell gibt es für jeden Boden einen spezifischen Wassergehalt, bei dem der stärkste Zerfall zu erwarten ist. Deshalb ist die Zerfallsziffer Z(8) bei mindestens 5 unterschiedlichen Wassergehalten bzw. Einbaufestigkeiten – bei Ton beispielsweise mit c_u -Werten zwischen 10 und 70 kPa – zu ermitteln. Im Bereich der Fließgrenze w_L ist aufgrund der hohen Wassersättigung erfahrungsgemäß mit sehr geringem Zerfall zu rechnen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann noch kein verlässlicher und reproduzierbarer Grenzwert für die Zerfallsziffer von Dichtungstonen angegeben werden. Nach bisherigen Erfahrungen nimmt bei Zerfallsziffern oberhalb von $Z(8) = 0,05$ die Erosionsanfälligkeit des Dichtungsmaterials zu. Bei einem negativen Ergebnis des Zerfallsversuchs und des Pinhole-Tests (siehe Abschnitt 4.5) ist das Dichtungsmaterial ohne zusätzliche Maßnahmen (z. B. Sandausgleichsschicht bei relativ grobkörnigem Untergrund bzw. Anwendung eines Geotextils für Bodentyp 4 nach TLG [17]) nicht in der Wasserstraße einsetzbar.

4.5 Erosionstest (Pinhole-Test)

4.5.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Dichtungsmaterialien aus Naturton und Dichtungen mit hydraulischen Bindemitteln und Ton.

Zur Bestimmung der Erosionsfestigkeit von Dichtungsmaterialien wird ein modifizierter Pinhole-Test in Anlehnung an ASTM D 4647 [14] durchgeführt. Die Ergebnisse erlauben eine Beurteilung von Dichtungen hinsichtlich ihrer Beständigkeit bei konzentrierten Durchströmungen, wie sie beispielsweise bei durchwurzelten Tondichtungen oder auch bei Dichtungen auf sehr grobkörnigem Untergrund vorkommen können.

Beim Pinhole-Test strömt Wasser durch einen in der Probe definiert hergestellten Durchflusskanal. Die Veränderung des Durchflusskanals nach einer vorgegebenen Durchflusszeit wird bewertet.

4.5.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Probekörper ($d = 10\text{ cm}$, $h = 10\text{ cm}$) wird mit einer den späteren Einbauverhältnissen entsprechenden Festigkeit in einen Versuchszylinder eingebaut, der im Wesentlichen dem zur Prüfung der Wasserdurchlässigkeit nach Bild 6 der DIN 18130-1 [4] entspricht. In der Probenachse wird mit einem Metall- oder Glasstab entlang der gesamten Probenhöhe ein durchgängiges Loch mit einem Durchmesser von 8 mm hergestellt. Danach wird die Versuchszelle in eine Durchströmungsanlage (Wasserkreislauf) eingebaut, in der das Wasser von einem Vorratsbehälter aus mit einem konstanten Gefälle – entsprechend 5 m Wassersäule über der Dichtung in der Wasserstraße – durch die Probe fließt (Bild 7).

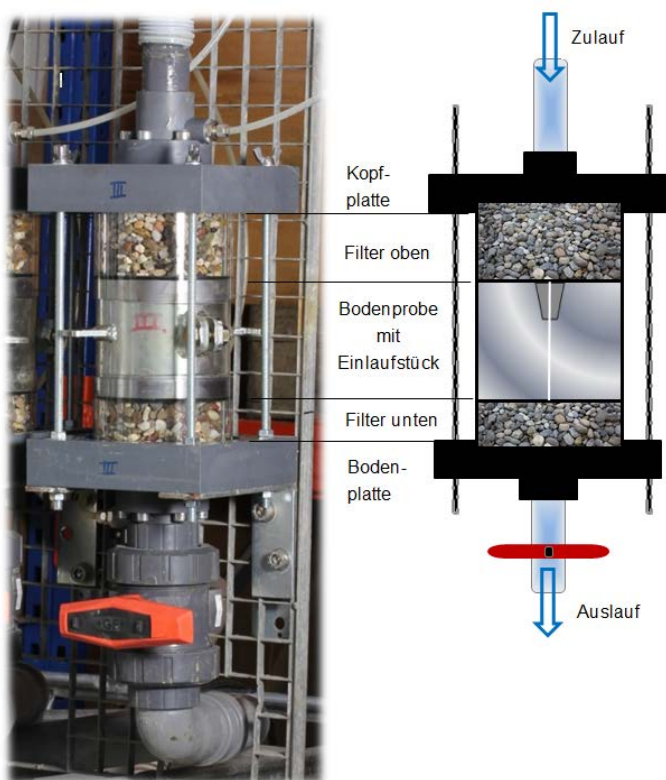


Bild 7: Versuchsaufbau Pinhole-Test

Das durchströmte Wasser wird wieder in den Vorratsbehälter vor dem Probeneinlauf zurückgepumpt, so dass ein stetiger Wasserkreislauf aufrecht erhalten bleibt. Nach einer Durchströmungsdauer von mindestens 200 Stunden wird die Probe ausgebaut.

4.5.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Die Probe wird nach der Durchströmung entlang ihrer Längsachse aufgeschnitten und der Durchströmungskanal begutachtet. Als Richtgröße gilt, dass sich der Lochdurchmesser nach der Durchströmung an keiner Stelle um mehr als 100 % vergrößert haben darf. Bild 8 und Bild 9 zeigen beispielhaft ein positives bzw. ein negatives Versuchsergebnis.

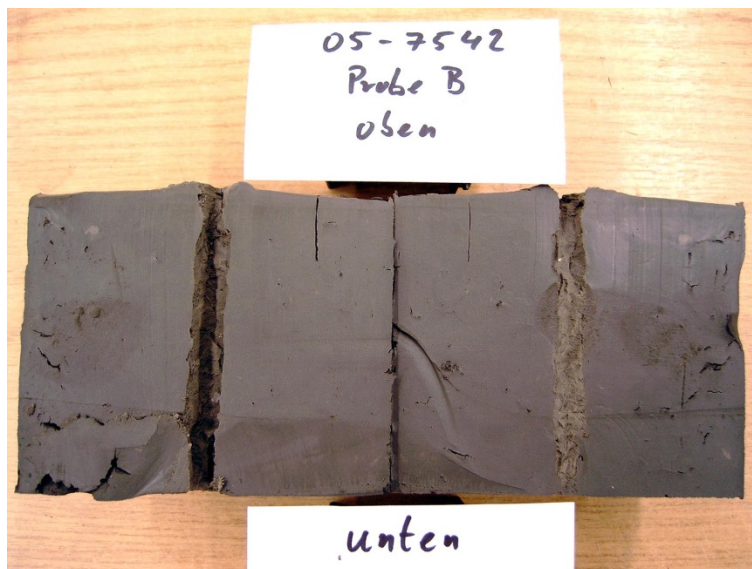


Bild 8: Ergebnis eines Pinhole-Tests (1) – Durchflusskanal ohne nachteilige Veränderungen – Grenzwert eingehalten

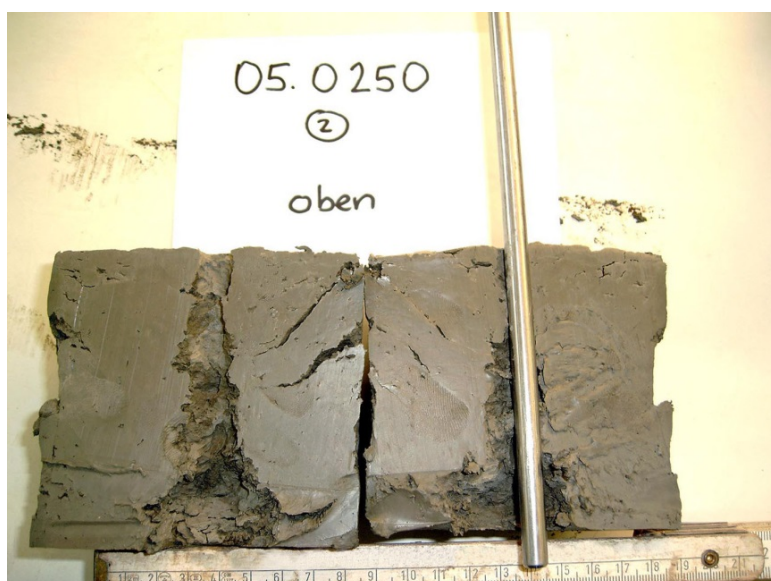


Bild 9: Ergebnis eines Pinhole-Tests (2) – Durchflusskanal mit starken Veränderungen – Grenzwert nicht eingehalten

4.6 Flexibilitätstest (Balkenbiegetest)

4.6.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Dichtungsmaterialien aus Naturton und dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln. Für Letztere erfolgt die Prüfung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen. Der Balkenbiegetest dient der Prüfung der Flexibilität von Dichtungsstoffen. Für GTD kann eine ausreichende Flexibilität ohne Nachweis vorausgesetzt werden.

4.6.2 Versuchsaufbau und -durchführung

In einer Kastenform wird ein Probekörper mit den Abmessungen 50 cm x 10 cm x 10 cm in einer den späteren Einbaubedingungen entsprechenden Konsistenz und Dichte hergestellt. Dabei dürfen am fertigen Probekörper an der Probenunterseite keine Inhomogenitäten bzw. Risse vorhanden sein, ansonsten ist die Probe zu verwerfen.

Der Probekörper (Biegebalken) wird aus der Form genommen und auf ein Versuchsgestell (siehe Bild 11) gelegt, dessen Auflagerpunkte 40 cm voneinander entfernt sind. Zuvor werden auf die Balkenunterseite ein Vlies und über den Auflagerpunkten mehrere dünne, sehr flexible Bleche ($d = 0,7$ mm) aufgelegt, um dem Balken beim späteren Biegevorgang eine kontrollierte Biegelinie „aufzuzwingen“ und mögliche Rissbildungen in den Auflagerpunkten zu minimieren.

Damit sich der Balken nicht schon vor dem eigentlichen Versuchsbeginn infolge seines Eigengewichts durchbiegt, wird der Balken zunächst in der Mitte mit einer regulierbaren Hebebühne unterstützt.

Auf die Balkenoberseite wird ein Druckkissen aufgelegt und mit Schrauben am Gestell fixiert. Das Druckkissen kann von Hand mit Luft aufgepumpt werden und dient dazu, eine gleichmäßige Streckenlast auf den Biegebalken aufzubringen. Bild 10 und Bild 11 zeigen den Aufbau der Messapparatur.

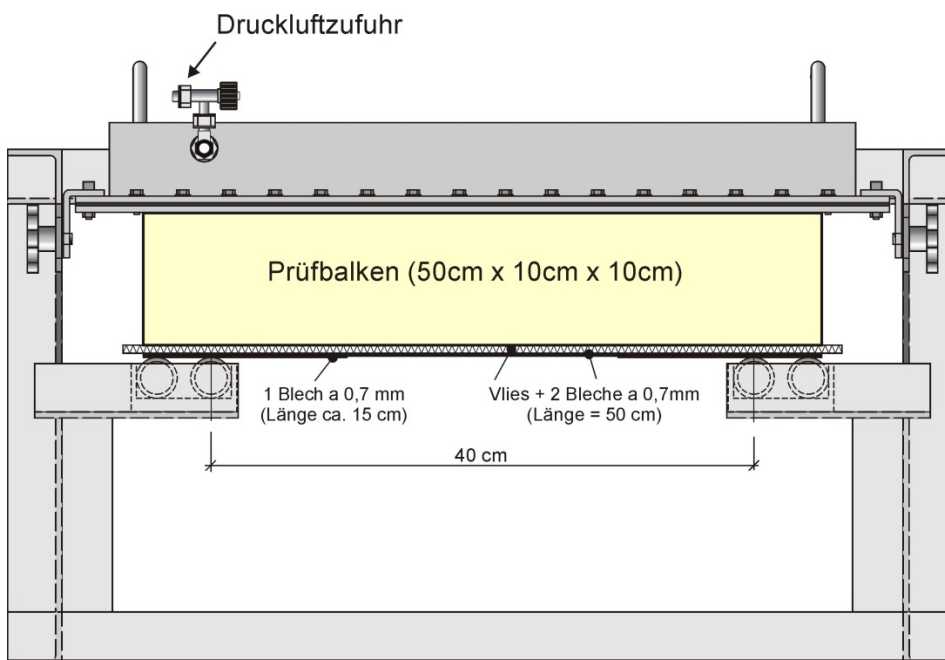


Bild 10: Aufbau der Messapparatur – maßstäbliche Skizze



Bild 11: Aufbau der Messapparatur (ohne Druckkissen) – Foto

Nach der Installation einer Messuhr in Balkenmitte wird diese auf den Nullwert gesetzt. Der Versuch wird begonnen, indem die Stützung in Balkenmitte durch langsames Absenken der Hebebühne entzogen wird. Infolge des nun wirksamen Eigengewichts des Probekörpers beginnt sich der Balken zu biegen. Nach Erreichen eines quasi Beharrungszustandes (Leichtes Kriechen des Balkens wird vernachlässigt) wird die Verformung photographisch dokumentiert und ein eventuelles Rissbild aufgenommen. Zur weiteren Durchbiegung des Balkens wird vorsichtig Druckluft über eine Handpumpe auf das Druckkissen an der Balkenoberseite gegeben. Das Aufpumpen sollte innerhalb von 60 s abgeschlossen sein. Die Verformung der Balkenunterseite ist an der Messuhr zu verfolgen. Ist eine Absenkung der Probe in Balkenmitte von $f = 20 \text{ mm}$ erreicht, ist der Balken wiederum auf Risse (Vorder- und Rückseite) zu überprüfen. Der Zustand des Balkens ist zu dokumentieren, die gegebenenfalls erreichte Risstiefe und -länge sind festzuhalten.

4.6.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Als ausreichend flexibel wird ein Material für eine Weichdichtung angesehen, wenn es einer Untergrundverformung mit einer Flankensteilheit von 1:10 oder steiler ohne schädliche Rissbildung folgen kann [2]. Für den Biegeversuch bedeutet das, dass der Probekörper (Auflagerabstand 40 cm) eine Verformung in Balkenmitte von $f = 20 \text{ mm}$ aufnehmen muss. An der Zugseite auftretende Risse dürfen dabei nicht tiefer als $1/3$ der Balkenhöhe in das Material hineinreichen. Bild 12 zeigt ein Beispiel für eine unzulässige Rissbildung bei 20 mm Durchbiegung.

Sind nach der Verformung von $f = 20 \text{ mm}$ keine Risse an der Probenunterseite festzustellen, kann zur weiteren qualitativen Abschätzung des Verformungsverhaltens die Absenkung in Balkenmitte weitergeführt werden, bis die maximal mögliche Durchbiegung bzw. die maximal zulässige Risstiefe erreicht ist.

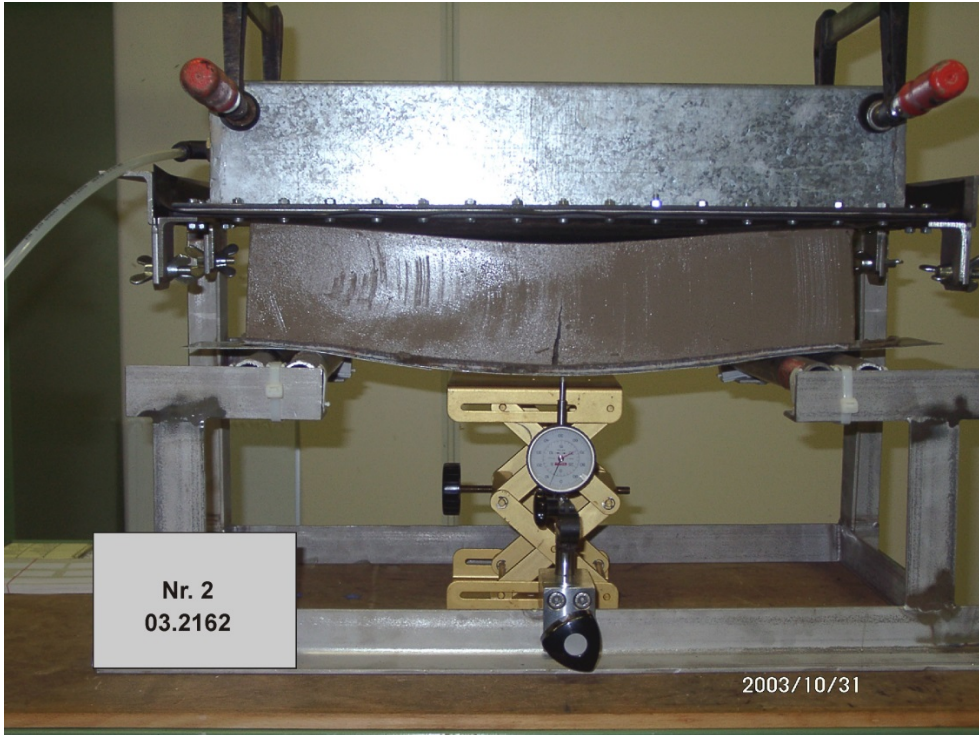


Bild 12: Materialprobe nach 20 mm Verformung: unzulässige Rissbildung

4.7 Ausspültest

4.7.1 Allgemeines

Zu prüfen sind dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln, die unter Wasser eingebaut werden. Fällt das Dichtungsmaterial beim Einbau frei durch das Wasser, so muss es einen ausreichenden Widerstand gegen die hierbei auftretende Erosion aufweisen. Dies wird mit dem Ausspültest geprüft. Der Dichtungsstoff wird bei der Prüfung in einem Siebkorb dreimal durch eine Wassersäule von 1 m Höhe geführt und der Masseverlust der Probe ermittelt.

4.7.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Das Prüfgerät (Bild 13) entspricht dem nach RPV [9] und besteht aus einem 120 cm hohen Plexiglaszylinder ($\varnothing = 20$ cm), der bis in 100 cm Höhe mit Wasser gefüllt wird. Der Siebkorb mit Deckel hat einen Durchmesser und eine Höhe von 13 cm und besteht aus einem Lochblech mit einem Lochdurchmesser von 3 mm. Er ist mit einem Gewicht von 2,7 kg verbunden, das abgehängt werden kann. Über zwei Umlenkrollen kann der Siebkorb durch das Gewicht komplett aus dem Wasserzylinder gezogen werden.

In den Siebkorb werden 2000 g der Dichtungsmasse den Einbaubedingungen entsprechend eingefüllt, durch leichtes Stampfen verdichtet und gewogen. Anschließend wird der Siebkorb angehängt, auf die Wasserfläche aufgesetzt und losgelassen, so dass er im freien Fall durch die 1 m hohe Wassersäule fällt. Dann wird das Gewicht angehängt und der Siebkorb durch das Gewicht gleichmäßig hochgezogen. Dieser Vorgang wird noch zweimal wiederholt. Danach wird die Masse der im Siebkorb zurückgebliebenen Dichtungsmasse bestimmt.

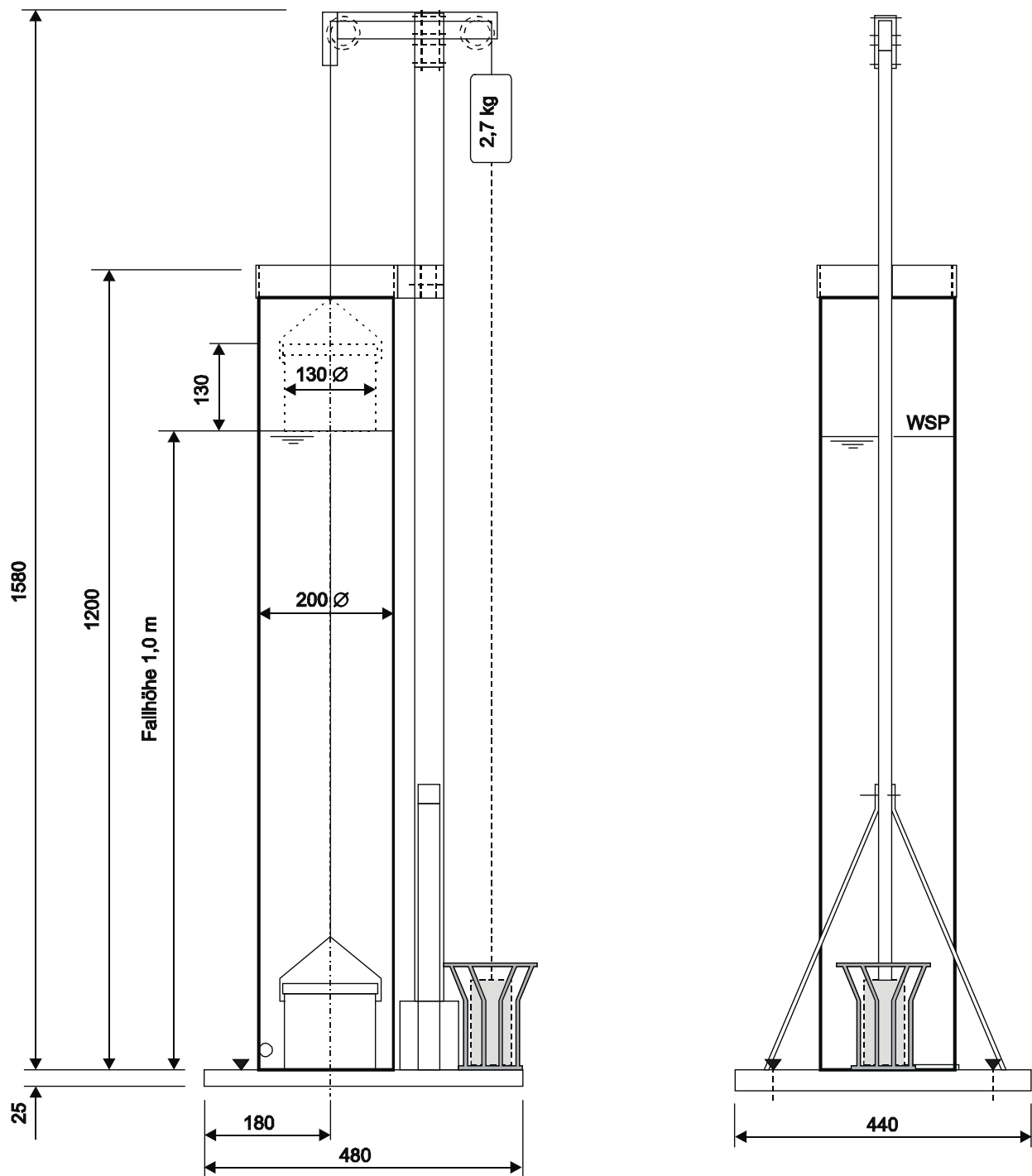


Bild 13: Prüfgerät für den Ausspülttest (Zeichnerische Darstellung)

4.7.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Aus der Massendifferenz wird der Masseverlust der Dichtungsmasse in Prozent berechnet. Die Dichtungsmasse besitzt einen ausreichend hohen Widerstand gegen Erosion, wenn der Masseverlust geringer als 6% ist.

4.8 Turbulenztest

4.8.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD).

Das Verfahren dient der Prüfung der Erosionsstabilität des von Geotextilien eingeschlossenen Bentonits gegenüber turbulenten äußeren Strömungsbelastungen.

Mit dem Prüfverfahren wird die turbulente Anströmung der GTD, wie sie z. B. durch Schiffswellen oder Schraubenstrahl auftritt, simuliert. Da die GTD-Probe jedoch entgegen den natürlichen Verhältnissen im Versuch mit der Oberseite nach unten eingebaut und von dort belastet wird, liefert das Prüfverfahren auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

4.8.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Das Prüfgerät (siehe Bild 14) entspricht dem für den Turbulenztest nach RPG [10], der detaillierte Versuchsaufbau ist dort dargestellt und beschrieben. Die Probenbehälter sind über das zentral im Plexiglasdeckel verschraubte Messingrohr mit dem Prüfrahmen fest verbunden, zudem erfolgt über das Rohr die Entlüftung bzw. der Druckausgleich im Probenbehälter während der Prüfung. Der Ruhewasserspiegel im Wasserbehälter wird anhand der Millimeterskala an der Plexiglasfrontschreibe eingestellt. Mit dem 4-armigen Turbulenzflügel wird bei 260 U/min eine turbulente Anströmung der GTD-Probe erzeugt.

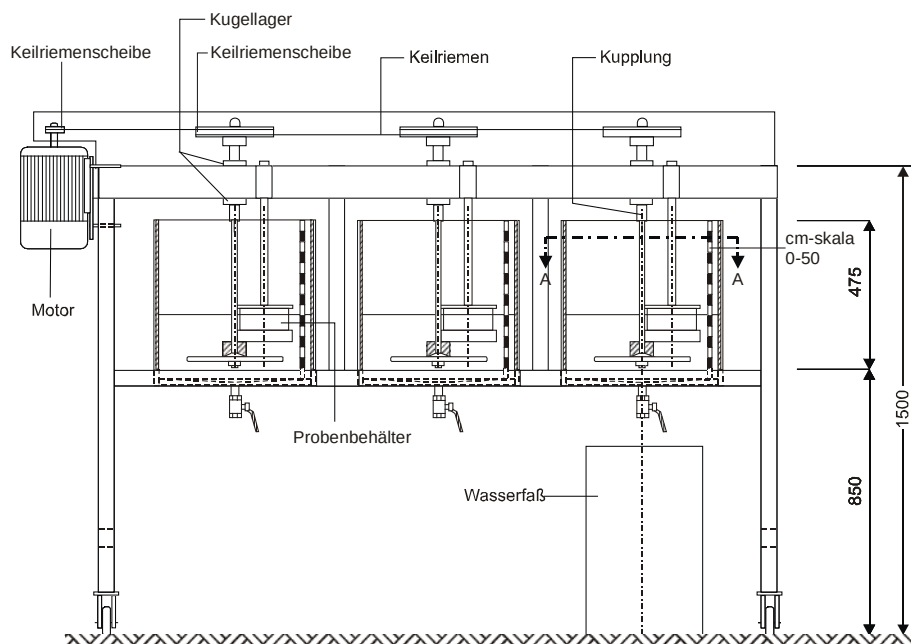
Aus der zu bewertenden Probe werden 3 Messproben mit einem Durchmesser von 168 mm ausgestanzt und in jeweils einen Probenbehälter mit der Einbauoberseite nach unten liegend eingebaut. Der Prüfkörper wird danach mit der oberen Abdeckung geschlossen und zur Wassersättigung 48 Stunden lang in Trinkwasser von 20 ± 5 °C bei 20 cm Wasserhöhe gelagert. Der Prüfkörper soll dabei schräg eingetaucht werden, um Lufteinschlüsse unter der GTD zu vermeiden. Nach diesem Quellvorgang der GTD ohne Auflast wird der Prüfkörper wieder geöffnet, und es werden 1500 g Splitt der Körnung 5/8 lose aufgeschüttet und mit einer einstellbaren Einbaulehre ebenflächig im Probenkörper verteilt.

Als Auflast wird eine 2130 g schwere Messingscheibe von 151 mm Durchmesser aufgebracht, so dass die GTD eine Flächenpressung von 2 kN/m^2 erfährt. Anschließend wird der Prüfkörper wieder geschlossen.

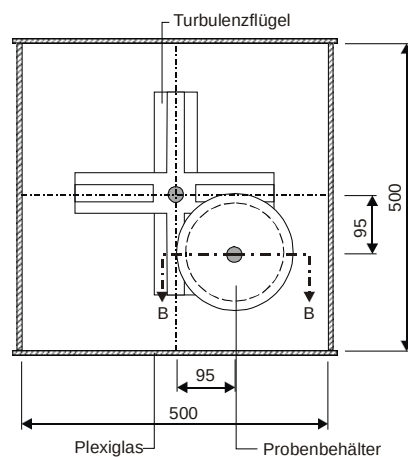
In den Prüfbehälter wird Trinkwasser auf 20,5 cm Höhe eingefüllt. Die Wassertemperatur in den Prüfbehältern wird bei Versuchsbeginn und am Versuchsende gemessen. Der Probenbehälter wird unmittelbar aus der Wasserlagerung heraus in den Prüfbehälter eingebracht. Dabei muss durch schräges Eintauchen ein Lufteinschluss unter der Prüffläche verhindert werden. Mit einem Abstandshalter von 3 cm Höhe zwischen Probenbehälterunterkante und Flügeloberkante wird der Probenbehälter höhenmäßig festgelegt und am Prüfrahmen eingespannt. Zur Prüfung wird der Abstandshalter entfernt.

Die turbulente Anströmung der Proben erfolgt 96 Stunden. Im Anschluss daran werden die Proben vorsichtig ausgebaut, Proben von 10 cm Durchmesser ausgestanzt und die Wasserdurchlässigkeit der GTD nach Abschnitt 4.2 geprüft.

Ansicht:



Schnitt A - A:



Schnitt B - B: Probenbehälter

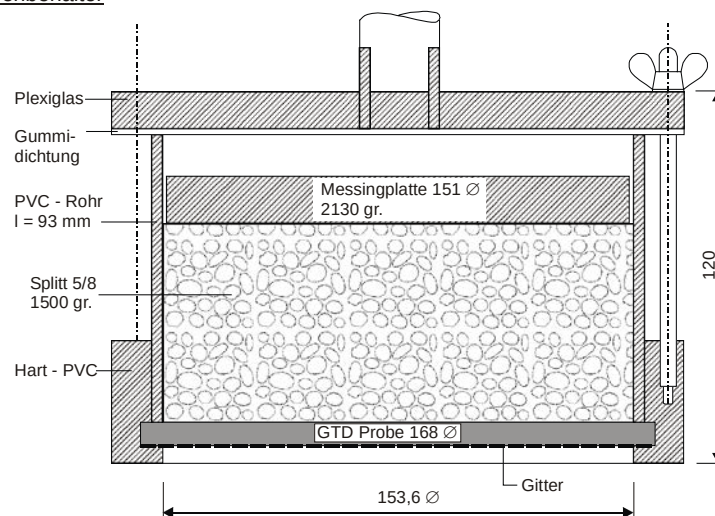


Bild 14: Prüfgerät nach RPG für die Bestimmung der Erosionsstabilität einer GTD (Zeichnerische Darstellung)

4.8.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Die Wasserdurchlässigkeit der GTD-Proben darf nach der Turbulenzbelastung die nach Punkt 4.2.3 im Gebrauchszustand maximal zulässige Erhöhung nicht übersteigen. Bei einer Potenzialdifferenz von 5 m bezogen auf 1 cm Probendicke ergibt sich daraus eine maximal zulässige Wasserdurchlässigkeit der GTD-Proben nach dem Turbulenztest von $k_{10} = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. eine maximale Permittivität von $\psi_{10} = 5 \cdot 10^{-8}$ 1/s.

4.9 Durchschlagtest

4.9.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD). Mit dem Prüfverfahren wird der Durchschlagwiderstand von Dichtungen gegenüber Stoß- bzw. Schlagbelastungen ermittelt, wie sie in Art und Größe beim Einbau von Wasserbausteinen durch Beschütten auftreten können.

Aufgrund von Erfahrungen ist der Nachweis des Durchschlagwiderstands für Naturtondichtungen mit einer undrainierten Scherfestigkeit beim Einbau von $c_u = 15$ bis 25 kN/m² und einer Einbaudicke von mindestens 20 cm nicht erforderlich. Für dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln kann bei einer üblichen undrainierten Einbauscherfestigkeit von $c_u = 5$ bis 10 kN/m² und einer Einbaudicke von mindestens 20 cm ebenfalls auf den Durchschlagtest verzichtet werden. Dies setzt voraus, dass die Dichtung mit einem Geotextil oder Kornfilter (Filter aus Gesteinskörnungen) beim Einbau der Wasserbausteine geschützt ist.

Die im Folgenden für die GTD beschriebene Versuchsdurchführung ist gegebenenfalls für andere Dichtungsmaterialien analog anzuwenden.

Bei der Prüfung von Geosynthetischen Tondichtungsbahnen ist zu unterscheiden, ob der Einbau der Dichtung im Trockenem oder im Nassen erfolgen soll.

Einbau der GTD im Trockenem bedeutet: Die Bentonitmatte wird nicht unter Wasser verlegt. Sie ist beim Einbau und Beschütten mit Wasserbausteinen trocken, der Bentonit ist nicht gequollen. Vor negativen Witterungseinflüssen (z. B. Starkregen) ist sie zu schützen.

In diesem Fall ist bei den GTD lediglich der Durchschlagwiderstand der den Bentonit umschließenden Geotextilien entscheidend. Eine Umlagerung des dazwischen eingelagerten Bentonits ist im ungequollenen Zustand gering, und wird beim Quellen des Bentonit weitestgehend ausgeglichen. Zur Prüfung des Durchschlagwiderstandes wird, analog zur Prüfung von Geotextilien nach RPG [10], der Fallbär mit definierter Fallenergie entsprechend Tabelle 1 auf die Messprobe abgeworfen, die auf einem definierten Prüfboden aufliegt und an ihrem Rand mit einer definierten Klemmspannung fixiert ist. Der Versuch liefert eine Ja/Nein-Aussage zum Durchschlagwiderstand von Geosynthetischen Tondichtungsbahnen durch die Sichtprüfung auf Beschädigungen der den Bentonit umschließenden Geotextilien per Augenschein am Versuchsende.

Einbau der GTD unter Wasser bedeutet: Der Einbau und das Beschütten mit Wasserbausteinen erfolgt unter Wasser, die GTD ist beim Beschütten, das vom Schüttgerüst von der Wasseroberfläche aus erfolgt, bereits gequollen. In diesem Fall wird im Versuch das Verhalten der GTD mit gequollener Bentonitfüllung beim Beschütten untersucht. Dabei darf die Bentonitfüllung durch den Aufprall der Wasserbausteine

(bzw. im Versuch des Fallbären) nicht so stark seitlich weggedrückt werden, dass die Dichtungsfunktion signifikant beeinträchtigt wird. Um dies beurteilen zu können, wird im Anschluss an die Belastung der GTD mit dem Fallbären zusätzlich zur Sichtprüfung auf Beschädigungen der den Bentonit umschließenden Geotextilien per Augenschein die Wasserdurchlässigkeit der Messprobe nach Abschnitt 4.2 geprüft.

Beim Unterwassereinbau („Einbau im Nassen“) der GTD werden die Wasserbausteine im Wasserwechselbereich in der Regel vom Land aus mittels Bagger verlegt. Die Ergebnisse des Durchschlagtests mit den Fallenergien nach Tab. 1 für den Einbau im Nassen können nur dann auf den Wasserwechselbereich übertragen werden, wenn die Wasserbausteine auf der GTD abgelegt und nicht aus 2 m Höhe abgeworfen werden. Ansonsten muss der Durchschlagtest mit den Fallgewichten für den Einbau im Trockenen durchgeführt werden.

4.9.2 Versuchsaufbau und -durchführung

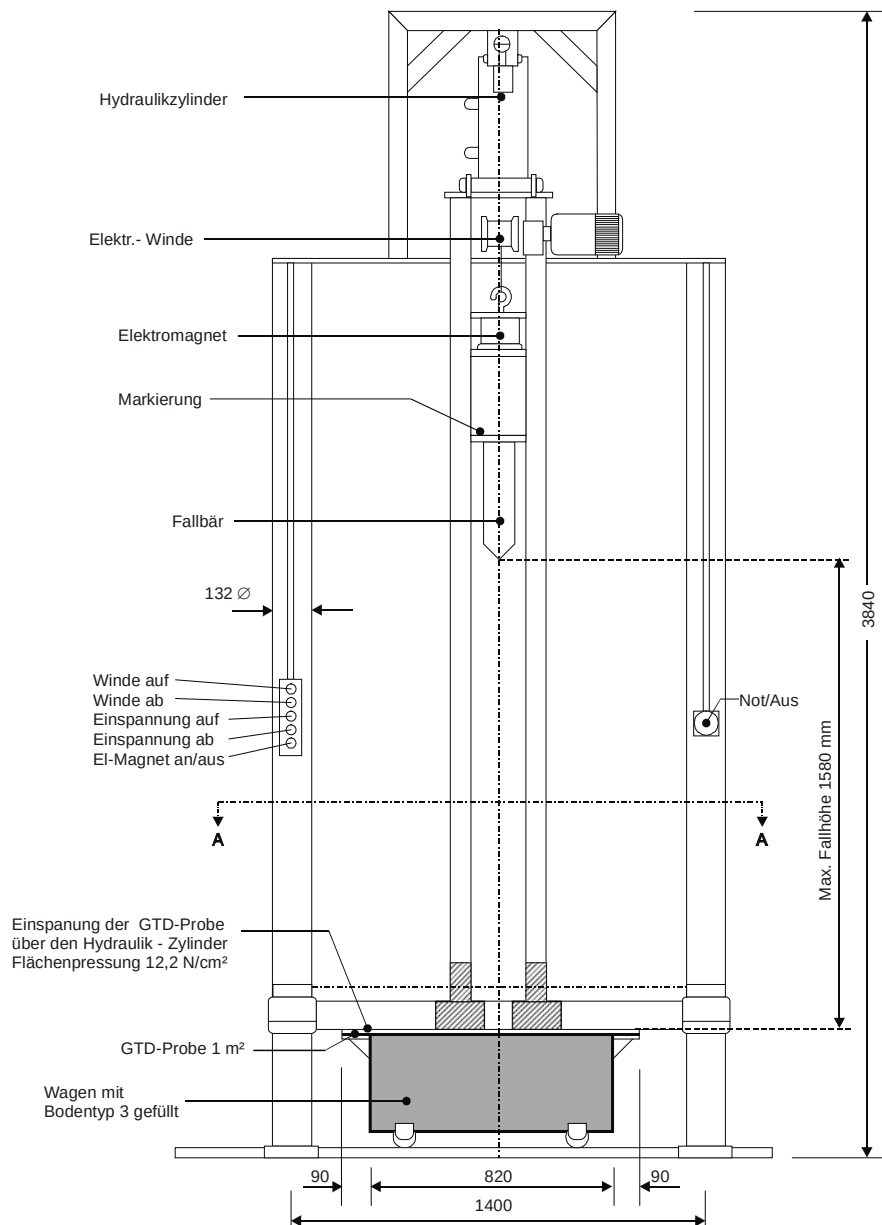
Die Versuchseinrichtung – in Bild 15 dargestellt – besteht aus

- einem 4-säuligen Stahlrohrrahmen mit zentraler 2-säuliger Fallbärführung,
- einem Fallbären aus Stahl mit definierter Schneide,
- einem Elektromotor zum Anheben des Fallbären,
- einem Elektromagneten zur An- und Abkoppelung des Fallbären,
- einer Hydraulik zum Anheben des 4-säuligen Rohrrahmens für den Ein- und Ausbau der Messproben,
- einer Hydraulik zum Einklemmen der Messprobe mit einer definierten Einspannung von 12,2 N/cm² während der Prüfung,
- einem Wagen zur Aufnahme des Sandbettes und der Messprobe mit einer Grundfläche von 80 cm x 80 cm und einer Tiefe von 31 cm.

Die für die Versuchsdurchführung maßgebende Fallenergie ist abhängig von der Größe bzw. Masse und Einbauart der verwendeten Wasserbausteine. Je nach Steinklasse entsprechend TLW 2003 [12] ergibt sich eine andere maßgebende Steingröße bzw. Steinmasse, die der Untersuchung zu Grunde zu legen ist. Bei den leichten Gewichtsklassen (LMB) nach TLW 2003 [12] ist ein Überkornanteil von bis zu 30% zulässig, wobei die Einzelsteine des Überkorns das Doppelte eines Steines an der oberen Klassengrenze wiegen dürfen. Aus diesem Grund wird bei den leichten Gewichtsklassen die doppelte Masse der oberen Klassengrenze als maßgebende Steinmasse angesetzt.

Für den Ansatz der Fallenergie werden je nach Einbauart zwei Fälle unterschieden:

- Beim Einbau im Trockenen wird die Fallenergie angesetzt, die der maßgebende Stein der verwendeten Steinklasse bei einem freien Fall durch die Luft aus 2 m Höhe beim Aufprall auf die GTD erzeugt.
- Beim Einbau unter Wasser wird die Fallenergie angesetzt, die der maßgebende Stein der verwendeten Steinklasse bei einer Beschüttung der GTD von der Wasseroberfläche aus besitzt. Die Ermittlung dieser Fallenergie erfolgt über die maximale Sinkgeschwindigkeit des jeweiligen Steins, die nach Knieß [7] ermittelt wird.



Schnitt A-A

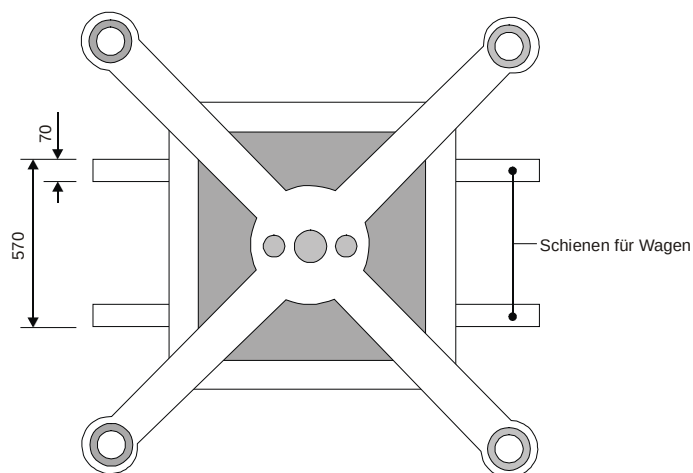


Bild 15: Prüfgerät zur Bestimmung des Durchschlagwiderstandes nach RPG (Zeichnerische Darstellung)

Für die gebräuchlichsten Steinklassen nach TLW 2003 [12] sind die entsprechenden Fallenergien in Tabelle 1 zusammengestellt. Im Gegensatz zur Prüfung von Geotextilien nach RPG [10] ist bei der Prüfung der GTD der größte bzw. schwerste Stein der jeweiligen Steinklasse unter Berücksichtigung des Überkornanteils für die Prüfung maßgebend, da jede unzulässige Beschädigung der GTD zu einem lokalen Versagen der Dichtung führen kann. Die maßgebende Fallenergie für eine größere Steinklasse muss ggf. analog zu diesem Vorgehen berechnet werden.

Die Prüfung des Durchschlagwiderstandes wird bei Raumtemperatur an mindestens 3 (für Trockeneinbau) bzw. mindestens 5 (für Nasseinbau) quadratischen Proben mit einer Kantenlänge von jeweils 100 cm durchgeführt. Bei der Prüfung für einen Einbau im Nassen müssen die Proben vor Versuchsdurchführung 24 h unter Wasser gelagert werden.

Bei der Regelprüfung wird als Prüfboden ein trockener Boden des Bodentyps 3 nach MAG [8] verwendet. Das Prüfungsergebnis kann nicht auf signifikant grobkörnigere oder festere Böden übertragen werden, dafür kann abweichend von der Standarddurchführung ein repräsentativer Boden in den Wagen eingefüllt werden. Der Prüfboden wird außerhalb des Prüfgerüsts in den Wagen gefüllt, durch Stampfen mitteldicht verdichtet und zum Schluss bündig mit der Oberkante des Wagens abgezogen. Die trockene oder gequollene Probe wird mit der bestimmungsgemäßen Unterseite so auf den Prüfboden aufgelegt, dass die Richtung der ermittelten geringeren Höchstzugkraft (Längs- oder Querrichtung) einen rechten Winkel zur Schneidenlängsachse des Fallbären bildet.

Der so vorbereitete Probenwagen wird unter den Prüfraumen in die Prüfposition gebracht und die Randeinspannung der Probe hergestellt. Der Fallbär wird auf die erforderliche Fallhöhe aufgefahren, zur Prüfung ausgelöst und anschließend in Ruhestellung gesichert.

Bei der Prüfung für einen Einbau im Nassen, bei dem der Bentonit beim Einbau der Wasserbausteine bereits gequollen ist, erfolgt zusätzlich eine Begutachtung hinsichtlich möglicher unzulässiger Verquetschungen des weichen Bentonits in der Aufprallfläche. Dazu werden im Bereich des geringsten Verrundungsradius des Fallbären 2 Proben von 10 cm Durchmesser ausgestanzt (Bild 16) und die Wasserdurchlässigkeit nach Abschnitt 4.2 geprüft.

Tabelle 1: Erforderliche Fallenergien für den Durchschlagtest

Bemerkung: Änderungen zur RPW (2006), da nach /GBB, 2010/ $\psi = 1,8$ statt früher 1,6

Steinklasse nach TLW 2003	Gesteinsdichte ρ_s	Maximaler Siebdurchmesser D	Maximale Steinmasse G	Größte Kantenlänge des maximalen Steins L	Erforderliche Fallenergie der Prüfung für einen Einbau	
					im Trockenen	im Nassen
CP _{90/250}	2650 kg/m ³	36 cm	80 kg	56 cm	1600 Nm	510 Nm
	3000 kg/m ³	36 cm	90 kg*	56 cm	1800 Nm	710 Nm
CP _{90/250} (ohne Überkorn)	2650 kg/m ³	25 cm	30 kg*	39 cm	600 Nm	120 Nm
	3000 kg/m ³	25 cm	30 kg*	39 cm	600 Nm	170 Nm
LMB _{5/40}	2650 kg/m ³		80 kg	56 cm	1600 Nm	510 Nm
	3000 kg/m ³		80 kg	54 cm		610 Nm
LMB _{5/40} (ohne Überkorn)	2650 kg/m ³		40 kg	45 cm	800 Nm	210 Nm
	3000 kg/m ³		40 kg	43 cm	800 Nm	250 Nm

*Werte nach Rundung

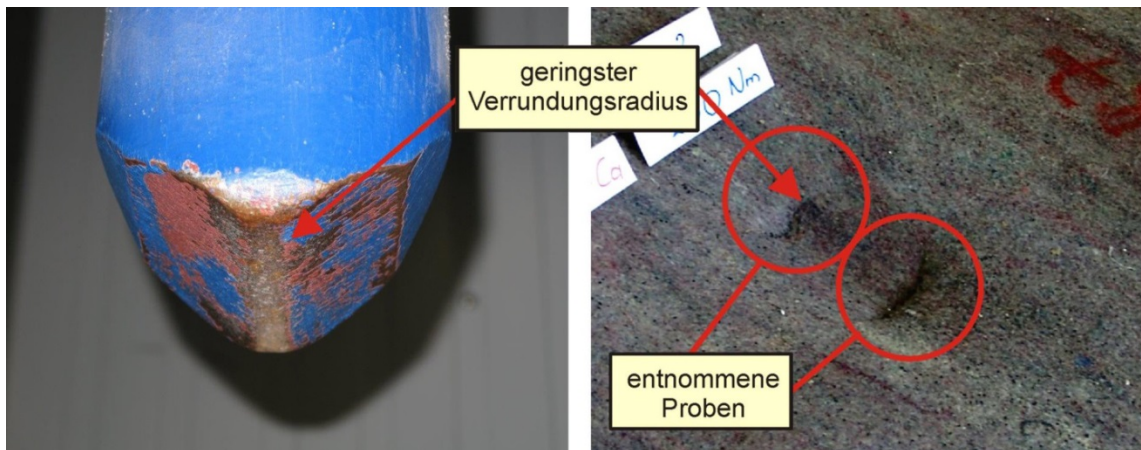


Bild 16: Schneide des Fallbären und Ort der Probenentnahme im Bereich des geringsten Verrundungsradius des Fallbären

4.9.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Die Probe wird im ein- und ausgebauten Zustand auf sichtbare Beschädigungen untersucht. Schäden sind Löcher und alle Veränderungen, die auf Minderung der Filterstabilität und Festigkeit (u. a. Schäden an Schuss- oder Kettfäden, Fadenverschiebungen, Faserverdrängungen) sowie der Dichtungsfunktion (Verdrängung des Bentonit) hindeuten. Bentonit darf durch die Belastung nur in vernachlässigbarer Menge durch das Geotextil durchgedrückt werden.

Zusätzlich darf bei Untersuchungen für den Unterwassereinbau die Wasserdurchlässigkeit der ausgestanzten GTD-Proben die nach Punkt 4.2.3 im Gebrauchszustand maximal zulässige Erhöhung des geforderten Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes nicht übersteigen. Bei einer Potenzialdifferenz von 5 m bezogen auf 1 cm Probendicke ergibt sich daraus eine maximal zulässige Wasserdurchlässigkeit der GTD-Proben von $k_{10} = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. eine maximale Permittivität von $\psi_{10} = 5 \cdot 10^{-8}$ 1/s.

4.10 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes der GTD bei Dehnung

Zu prüfen sind Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD). Es wird die Durchlässigkeit einer gedehnten GTD untersucht.

Die GTD darf nicht planmäßig zur Lastabtragung herangezogen werden. Trotzdem kann sie beim Verlegen und Beschütten lokal gedehnt werden. Diese Dehnung darf die Durchlässigkeit der GTD nicht unzulässig vergrößern.

Die Durchlässigkeit bei Dehnung muss nicht gesondert bestimmt werden. Es ist ausreichend, die Durchlässigkeit der GTD (k-Wert nach Kap. 4.2) in dem beim Durchschlagtest gedehnten Bereich (siehe Kap. 4.9) zu ermitteln. Bei Prüfungen für den Unterwassereinbau wird der k-Wert bereits im Rahmen des Durchschlagtests bestimmt (Kap. 4.9.2). Bei Prüfungen für den Einbau im Trockenen ist die k-Wert-Bestimmung nach dem Durchschlagtest nur für den Nachweis der Durchlässigkeit bei Dehnung erforderlich. Dazu wird der Aufprallbereich nach dem Durchschlagtest gekennzeichnet und die GTD-Probe vor der k-Wertermittlung 24 h gewässert. Mit dem Ergebnis ist auf der sicheren Seite liegend eine Beurteilung des Einflusses der Dehnung auf die Durchlässigkeit der GTD für den Bereich der Wasserstraße möglich. Es gelten die Grenzwerte des Durchschlagtests.

4.11 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes der GTD in Überlappungsbereichen

4.11.1 Allgemeines

Zu prüfen sind Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD). Es wird die Durchlässigkeit im Überlappungsbereich zweier GTD-Bahnen untersucht. Dazu muss der vorgesehene Aufbau der Überlappungsbereiche bekannt sein. Die Gewährleistung des geforderten k -Wertes in den Überlappungsbereichen kann z. B. durch bereits werkseitig bentonitgetränkte Ränder (für den Einbau unter Wasser) oder durch das Einsmieren der Überlappungsbereiche mit Bentonitpaste auf der Baustelle beim Einbau im Trocknen erfolgen. Der Versuch ist entsprechend der vorgesehenen Konstruktion durchzuführen.

Die Grundzüge für die Prüfung der Durchlässigkeit in den Überlappungsbereichen sind in den EAG-GTD [5] und die Anforderungen in den EAO [2] geregelt. Ergänzend sind nachfolgend die Besonderheiten für Prüfungen im Verkehrswasserbau beschrieben. Zu beachten ist, dass die GTD in der Wasserstraße i. d. R. quer zur Kanalachse verlegt wird und die hydraulische Belastung bei Verlegung unter Wasser in voller Höhe sofort nach dem Einbau wirkt.

4.11.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Den Versuchsaufbau zur Prüfung der Durchlässigkeit von Überlappungsbereichen der GTD zeigt Bild 17.

Folgende Randbedingungen sind beim Einbau der Proben und bei der Prüfung zu beachten:

- Die Prüfung erfolgt für die Überlappung der Mattenlängsseite. Eine ausreichende Dichtigkeit an den Mattenquerseiten (Mattenenden) ist konstruktiv bei der Verlegung sicherzustellen.
- Die Überlappung bei der Prüfung darf maximal 30 cm betragen, geringere Überlappungen während der Prüfung sind zulässig. Die entsprechend der Regelwerke beim Einbau in Wasserstraßen erforderlichen größeren Überlappungsbreiten beinhalten eine dementsprechende Sicherheit.
- Die Länge des Überlappungsbereichs muss mindestens 25 cm betragen.
- Die Prüfung soll mit Druckhöhen von 1 m Wassersäule und 5 m Wassersäule erfolgen. Der höhere Durchlässigkeitsbeiwert ist maßgebend. Projektspezifisch können auch andere Druckhöhen erforderlich sein.
- Die Auflast auf der GTD darf $g' = 6 \text{ kN/m}^2$ (unter Auftrieb) nicht überschreiten.
- Als Basismaterial, auf dem die GTD in der Prü fzelle aufgelegt wird, ist Grobkies zu verwenden. Als Auflastmaterial ist Grobkies oder eine gröbere Gesteinskörnung zu verwenden.
- Randumläufigkeiten sind im Versuchsaufbau konstruktiv auszuschließen.
- Die hydraulische Belastung während der Prüfung muss entsprechend dem Einbau in der Wasserstraße direkt nach Einbau, d. h. ohne vorheriges Quellen, erfolgen.
- Ergänzend ist bei jedem Versuch der Wassergehalt des Bentonits vor und nach der Prüfung zu bestimmen, außerdem ist die Wasseraufnahme nach Enslin (DIN EN ISO 10769 – [11], DIN 1832) zu ermitteln. Die Ein- und Ausbaudicke der GTD ist zu dokumentieren.
- Der Versuch ist bis zum konstanten Durchfluss durchzuführen.

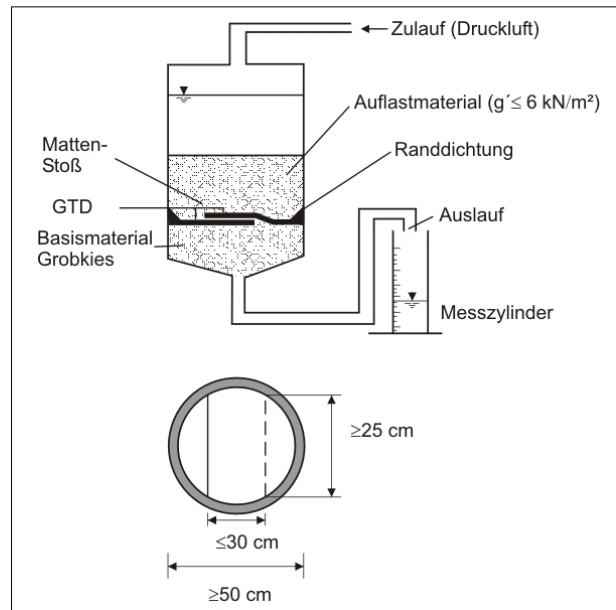


Bild 17: Versuchsanordnung zur Prüfung der Durchlässigkeit von GTD-Überlappungsbereichen (Zeichnerische Darstellung)

4.11.3 Versuchsauswertung und Grenzwerte

Aus dem hydraulischen Gradienten und den je Zeiteinheit gemessenen Durchflussmengen ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_{10} des Überlappungsbereichs zu ermitteln. Bezugsdicke ist hier wie bei der Ermittlung der Durchlässigkeit in der Fläche (siehe Kap. 4.2.) die planmäßige Ausgangsdicke der einfachen GTD. In gleicher Weise kann die Permittivität ermittelt werden.

Der Durchlässigkeitsbeiwert bzw. die Permittivität darf im Überlappungsbereich nicht höher als in der Fläche sein (Grenzwerte siehe Punkt 4.2.3).

5 Grundsätzliche Eignung der Unterwasser-Einbauverfahren

5.1 Anforderungen an die Einbauverfahren

5.1.1 Allgemeines

Der in der Regel übliche Einbau von Weichdichtungen unter Wasser bei Aufrechterhaltung der Schifffahrt stellt besondere Anforderungen an die Einbau- bzw. Verlegetechnik. Die Eigenschaften der Dichtungsstoffe dürfen sich durch die Randbedingungen des Einbaus und der folgenden Bauschritte nicht negativ verändern (z. B. durch Dehnung beim Verlegen, Fallen/ Pumpen durchs Wasser, Beschüttung mit Wasserbausteinen). Da die Wirksamkeit einer Dichtung neben dem Dichtungsmaterial entscheidend von der Ausbildung der Anschlüsse, Fugen und Nähte sowie Überlappungen bestimmt wird, muss das Einbauverfahren unabhängig von der Ausführungsqualität eine systembedingte Sicherheit gegen das Auftreten von Fehlstellen besitzen (z. B. durch entsprechende Überlappungen einzelner Bahnen).

In den folgenden Kapiteln 5.1.2 bis 5.1.4 werden die grundsätzlichen Anforderungen an die Verfahren zum Unterwassereinbau der verschiedenen Weichdichtungen dargestellt.

5.1.2 Naturtondichtungen

Der Naturton ist vor dem Einbau aufzubereiten, so dass eine homogene Dichtung entsteht, die den Anforderungen nach ZTV-W, LB 210 entspricht.

Das Unterwasser-Einbauverfahren muss sicherstellen [EAO], dass

- eine lückenlose Dichtung entsteht,
- Arbeitsfugen kontrolliert ausgeführt werden können,
- die vorgegebene Schichtdicke der Dichtung über die Fläche eingehalten wird,
- die Ausführung durch Eintrieb von Sedimenten nicht beeinträchtigt wird.

Um einen dichten Fugenschluss zu erreichen, muss das Verlegeverfahren eine genaue Positionierung der Einzelbahnen/-platten sicherstellen. Überlappungen sind anzudrücken, so dass eine gleichmäßige Oberfläche entsteht. Stumpfstöße sind zu vermeiden bzw. mit großer Sorgfalt auszuführen [EAO]. Ferner muss das Verfahren gewährleisten, dass keine Risse auftreten [EAO].

5.1.3 Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD)

Die Unterwasser-Verlegung der GTD hat ähnlich wie die Verlegung von geotextilen Filtern durch Abrollen auf Böschung und Sohle zu erfolgen. Bewährt hat sich das gleichzeitige Verlegen einer GTD und einer Sandmatte als unmittelbarer Schutz und Ballastierung beim Verlegen unter Wasser. Dabei können die Matten einzeln übereinander gelegt oder auch fest miteinander verbunden, z. B. vernadelt, sein. Das wesentlich höhere Flächengewicht von Bentonit- und Sandmatte (etwa 13 kg/m² im trockenen Zustand) schränkt die verwendbaren Einbaugeräte ein.

Das Planum muss eben und frei von Steinen sein. Einzelne scharfkantige Steine könnten sich ansonsten in die darüber verlegte GTD drücken und beim Beschütten der Dichtung zu lokalen Beschädigungen der Matte führen.

Das Verlegegerät muss fest positioniert werden (z. B. auf Stelzen), um ein sicheres Verlegen der GTD zu garantieren. Das Verlegen der einzelnen Bahnen muss in einem Zug mit einem Gerät erfolgen können. Eine Übergabe der Mattenrolle z. B. von einem Landgerät auf ein Wassergerät während des Verlegevorganges birgt die Gefahr des Verziehens der Matten und dadurch entstehender Überwerfungen in den Überlappungen und ist deshalb nicht zulässig.

Das Abrollen der Bentonit- und ggf. Sandmatte muss direkt auf der Oberfläche von Böschung und Sohle erfolgen. Die Abrolleinrichtung muss eine starre, feste Führung der Bentonit- und Sandmatte beim Verlegen garantieren, um ein faltenfreies Verlegen der GTD sicherzustellen. Wichtig ist auch, dass die GTD dabei spannungsfrei bleibt. Dies erfordert in der Regel eine motorunterstützte Abrolleinrichtung.

Ein „Überspannen“ des Übergangsbereiches von der Böschung zur Sohle durch die GTD ist durch entsprechende Verlegung und gegebenenfalls Kontrollen auszuschließen.

Während der Verlegung dürfen keine Richtungskorrekturen erfolgen, da sonst Falten und Vorwölbungen im Überlappungsbereich entstehen können, die zu dauerhaften Undichtigkeiten führen können.

Stöße von GTD dürfen nur als Überlappungen mit einer Mindestbreite von 50 cm, in Kanallängsrichtung von 1,50 m ausgeführt werden. Ein Vernähen oder Verkleben ist derzeit nicht zugelassen.

Die einzelnen GTD-Bahnen müssen zügig nacheinander verlegt werden, um insbesondere Ablagerungen von gegebenenfalls anstehenden rolligen Böden in den Überlappungsbereichen der GTD-Bahnen, aber auch Sedimentablagerungen auf dem Feinplanum zu minimieren. Nach jeder längeren Arbeitspause (z. B. nach 24 h, Zeit ist den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten anzupassen) sind die Überlappungsbereiche durch Taucher zu kontrollieren und die Ablagerungen bei Bedarf zu entfernen. Dies gilt insbesondere für die bei jeweils halbseitigem Einbau verhältnismäßig lange frei liegende Längsüberlappung in Kanalmitte.

Um die GTD dauerhaft vor Frosteinflüssen zu schützen, ist im Wasserwechselbereich eine Schutzschicht aus kiesigem, gegenüber der Steinschüttung filterstabilem Material unmittelbar nach der Mattenverlegung vorzusehen. Dadurch wird bereits in der Bauphase eine Stabilisierung der Lage der verlegten Matten erreicht.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass die für die Längsüberlappung freibleibenden Enden infolge der Rückströmung vorbeifahrender Schiffe umschlagen können. Dies führt zu unsachgemäß hergestellten Überlappungen. Die verlegten Bahnen müssen deshalb vor dem Beschütten mit Wasserbausteinen durch Taucher kontrolliert werden. Oder es sind konstruktive Maßnahmen (z. B. lokale Belastung durch Schüttsteine) vorzusehen, die ein Hochschlagen während der Bauphase verhindern.

Das Beschütten der verlegten Bentonit- und ggf. Sandmatten muss im Böschungsbereich konsequent von unten nach oben erfolgen. Zu verwenden ist ein Schüttgerüst, in dem die Lamellen einzeln nacheinander abgesenkt werden. Ist das nicht verfügbar, muss in „kleinen Schritten“ abschnittsweise beschüttet werden. Dies ist besonders wichtig in Übergangsbereichen, in denen der Grundwasserspiegel nur wenig unter dem Kanalwasserspiegel liegt, oder wenn gering durchlässige Böden im Kanalbereich anstehen. In diesem Fall kann das nach dem Verlegen der GTD unter der Matte befindliche Restwasser nur langsam abfließen. Die Lagestabilität der Matte kann dadurch zunächst herabgesetzt sein, so dass ein unsachgemäßes Beschütten mit Steinen zu Rutschungen der Matte führen kann. Eine Vernagelung der Matte oberhalb der Böschung oder andere Maßnahmen zur Befestigung können bei dem Beschütten mit Wasserbausteinen zu einer unzulässigen Zugbeanspruchung der Dichtungsbahnen führen, Befestigungen sind deshalb nicht anzuwenden.

5.1.4 Dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln

Der Einbau einer dauerplastischen Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln erfolgt analog zum Einbau von Vergussmörtel. Die Konsistenz des Dichtungsmaterials muss beim Einbau fließfähig sein. Die erforderliche Flexibilität im Endzustand ergibt sich aus den Anforderungen an eine Weichdichtung (siehe Kap. 4.6).

Das Dichtungsmaterial ist vor dem Einbau aufzubereiten, so dass eine homogene Dichtung entsteht, die den Anforderungen nach ZTV-W, LB 210 entspricht.

Das Einbauverfahren muss sicherstellen, dass

- eine lückenlose Dichtung entsteht,
- eine gleichmäßige Dichte des Dichtungsmaterials gewährleistet wird,

- die vorgegebene Schichtdicke der Dichtung über die Fläche eingehalten wird,
- die Ausführung durch Eintrieb von Sedimenten nicht beeinträchtigt wird.

5.2 Nachweis der grundsätzlichen Eignung von Einbauverfahren

5.2.1 Allgemeines

Im Rahmen des Nachweises der grundsätzlichen Eignung durch eine Grundprüfung sind die in Anlage 3 aufgeführten Kennwerte zu ermitteln und die in Anlage 2 dargestellten Grenzwerte einzuhalten. Sinngemäß sind diese Anforderungen auch auf andere Verwendbarkeitsnachweise (z. B. Prüfung im Einzelfall) anwendbar.

Die Bestätigung über den Nachweis der grundsätzlichen Eignung (Musterzertifikat für eine erfolgreich absolvierte Grundprüfung siehe Anlage 4) wird einer Baufirma von der BAW oder einer hierfür anerkannten Prüfstelle für ein firmenspezifisches Verlegeverfahren von Weichdichtungen in Bundeswasserstraßen erteilt. Mit diesem wird bestätigt, dass das Einbauverfahren die in Kap. 5.1 dargestellten Anforderungen erfüllt.

Voraussetzung für die praktische Durchführung der Prüfung ist die Vorlage einer detaillierten Beschreibung des Verfahrens und des einzusetzenden Geräteparks.

Die Randbedingungen der Prüfung (z. B. Einbau auf der Sohle oder im Böschungsbereich, eingebaute Schichtdicke, zu berücksichtigende Deckschichten) werden im Prüfzeugnis vermerkt. Das Prüfzeugnis hat eine Gültigkeit von 5 Jahren und muss nach Ablauf dieser Frist neu beantragt werden. Für Verfahren, die laufend und ohne Probleme (erfolgreiche vergleichbare Bauvorhaben, erfolgreiche Eignungs- und Kontrollprüfungen) im Einsatz sind, kann das Prüfzeugnis ohne weitere zusätzliche Untersuchungen verlängert werden. Für Verfahren, die nicht oder nicht erfolgreich im Einsatz waren, muss der Nachweis der grundsätzlichen Eignung ggf. erneut erbracht werden.

Die Prüfung wird in der Regel in einem Probebecken unter baustellenähnlichen Bedingungen (z. B. hinsichtlich Böschungsneigung) durchgeführt. Die Wassertiefe muss mindestens so groß sein, dass ein ausreichender Teil der Dichtung unter Wasser verlegt werden kann. Das Becken muss gelenzt werden können, um den Einbauerfolg zu begutachten.

In den folgenden Kapiteln 5.2.2 bis 5.2.4 werden die Randbedingungen und Anforderungen an die Prüfungen, die im Rahmen eines Verwendbarkeitsnachweises für die verschiedenen Einbauverfahren durchzuführen sind, erläutert.

5.2.2 Naturtondichtungen

Im Rahmen der Prüfung sind einerseits die qualitätsgerechte Aufbereitung des Tones und andererseits die qualitätsgerechte Verlegung der Tondichtung zu begutachten. Die Aufbereitung muss sicherstellen, dass der Ton homogen ist und die vorgeschriebene Festigkeit (siehe Kap. 4.3) besitzt.

Generell darf nur Ton verwendet werden, für den die grundsätzliche Eignung nachgewiesen wurde (siehe Anlage 3).

Die verlegte Dichtung wird nach Lenzen des Probebeckens begutachtet hinsichtlich

- Verlegegenauigkeit der einzelnen Bahnen, Platten o. ä. (je nach Verfahren),
- Fugenschluss/Qualität der Überlappungen,
- Rissefreiheit,
- Ebenflächigkeit der Tonoberfläche,
- Schichtdicke,
- Materialeigenschaften nach Einbau entsprechend Kap. 3 und 4.

Die Zuverlässigkeit des Einbauverfahrens wird anhand der gegebenen Verlege- und Systemsicherheiten bewertet.

5.2.3 Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD)

Generell darf nur eine GTD verwendet werden, für die die grundsätzliche Eignung oder die Verwendbarkeit nach Baubeschreibung (ZTV-W, LB 210 [1]) nachgewiesen wurde (siehe Anlage 3).

Die verlegte Dichtung wird nach Lenzen des Probebeckens begutachtet hinsichtlich

- Verlegegenauigkeit der einzelnen Bahnen,
- Qualität der Überlappungen (Sedimentfreiheit, Überlappungsbreite, ggf. offen stehende Falten im Überlappungsbereich),
- Ebenflächigkeit und Faltenfreiheit,
- Materialeigenschaften nach Einbau entsprechend Kap. 3 und 4.

Die Zuverlässigkeit des Einbauverfahrens wird anhand der gegebenen Verlege- und Systemsicherheiten bewertet.

5.2.4 Dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln

Generell darf nur Dichtungsmaterial verwendet werden, für das die grundsätzliche Eignung nachgewiesen wurde (siehe Anlage 3). Die Materialeigenschaften nach Einbau sind entsprechend Kap. 3 und 4 zu überprüfen.

Da der Dichtungsstoff unter Wasser wie Vergussmörtel eingebaut wird, ist kein gesonderter Nachweis der grundsätzlichen Eignung erforderlich. Die Firma muss ein Grundprüfungszeugnis für den Unterwasser-einbau von Vergussmörtel (Grundprüfung siehe RPV, MAV) besitzen.

6 Prüfungen für Einbauverfahren gemäß ZTV-W, LB 210

Nach ZTV-W, LB 210 [1] sind im Rahmen des Bauvertrages folgende Prüfungen durchzuführen:

- Eignungsprüfung (durchzuführen am Beginn der Baumaßnahme im Rahmen des Bauvertrages)
- Eigenüberwachungs-/Kontrollprüfungen (durchzuführen während der gesamten Bauzeit im Rahmen des Bauvertrages)

Im Rahmen des Bauvertrages ist entsprechend ZTV-W, LB 210 am Beginn der Baumaßnahme eine Eignungsprüfung durchzuführen. Dabei wird die qualitätsgerechte Verlegung der Dichtung unter Baustellenrandbedingungen geprüft. Während der Baumaßnahme sind Kontrollprüfungen des Auftraggebers und Eigenüberwachungsprüfungen des Auftragnehmers durchzuführen, um nachzuweisen, dass die Weichdichtung kontinuierlich in der erforderlichen Qualität eingebaut wird. Weitere Details regelt die ZTV-W, LB 210 [1].

Die im Rahmen dieser Prüfungen zum Einbauverfahren für die einzelnen Dichtungsmaterialien zu ermittelnden Kennwerte und die entsprechenden Grenzwerte enthält die ZTV-W, LB 210 [1].

7 Literatur

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau für Böschungs- und Sohlsicherungen (Leistungsbereich 210), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, in der aktuellen Fassung
- [2] Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Wasserstraßen (EAO), Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 85, 2002
- [3] Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltabdichtungen im Wasserbau. Essen: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 1983, 2. Auflage 1996 (z.Zt. in Überarbeitung)
- [4] DIN 18130, Teil 1: „Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Laborversuche“, Mai 1998
- [5] Empfehlungen zur Anwendung Geosynthetischer Tondichtungsbahnen, EAG-GTD, DGGT, Verlag Ernst&Sohn, 2002
- [6] DIN 4094, Teil 4 „Baugrund; Felduntersuchungen, Teil 4 Flügelscherversuche“, Januar 2002
- [7] Knieß, H.-G., „Schütten von Wasserbausteinen unter Wasser“; in Mitteilungsblatt Nr. 50, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 1981
- [8] Merkblatt „Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen“ (MAG); Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 1993
- [9] Richtlinien für die Prüfung von hydraulisch- und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (RPV), Bundesanstalt für Wasserbau, Eigenverlag, Karlsruhe 1990
- [10] Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG), Bundesanstalt für Wasserbau, Eigenverlag, Karlsruhe 1994
- [11] DIN 18132, Ausgabe 1995-12, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens
- [12] Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 2003
- [13] Endell, K., „Die Quelfähigkeit der Tone im Baugrund und ihre bautechnische Bedeutung“, Bau-technik 1941, Heft 19
- [14] ASTM D 4647, Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test, American Society for Testing and Materials, 1987

- [15] DIN EN 13362, Geosynthetische Dichtungsbahnen - Eigenschaften, die für die Anwendung beim Bau von Kanälen erforderlich sind, 07/2005
- [16] DIN EN ISO 10318, Geokunststoffe - Begriffe, 04/2006
- [17] Technische Lieferbedingungen für Geotextilien (TLG), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 2003
- [18] DIN EN ISO 10769, Geosynthetische Tondichtungsbahnen - Bestimmung der Wasseraufnahme von Bentonit (ISO 10769: 2011); Deutsche Fassung EN ISO 10769: 2011-09, Berlin, Beuth-Verlag
- [19] DIN EN ISO 13426-2, Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Festigkeit produktinterner Verbindungen - Teil 2: Geoverbundstoffe, August 2005
- [20] DIN EN ISO 9862, Geokunststoffe - Probenahme und Vorbereitung der Messproben (ISO 9862:2005); Deutsche Fassung EN ISO 9862: 2005-05, Berlin, Beuth-Verlag

Anlagen

Anlage 1: Übersicht – Prüfverfahren für Dichtungsstoffe

Anforderung	Prüfverfahren (RPW)	Norm / Vorschrift / Sonderversuch	Darstellung im Abschnitt	Zu prüfende Dichtungsmaterialien		
				Ton	GTD	DPTH ²⁾
Durchlässigkeit	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_{10} bzw. der Permittivität ψ_{10} • Dichtungsprobe • Dichtungsprobe bei Dehnung • Überlappungsbereich	DIN 18130	4.2	X	X	X
		Sonderversuch	4.10		X	
		Sonderversuch	4.11		X	
Festigkeit/ Scherfestigkeit	Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit c_u	DIN 4094, Teil 4	4.3	X		X
Zerfallsbeständigkeit	Zerfallstest nach Endell	Sonderversuch	4.4	X		
Erosionsbeständigkeit	Pinhole-Test	Sonderversuch	4.5	X		X
	Ausspülttest	Sonderversuch	4.7			X
	Turbulenztest	Sonderversuch	4.8		X	
Verformbarkeit/ Flexibilität	Balkenbiegetest	Sonderversuch	4.6	X		X
Festigkeit/ Durchschlagwiderstand	Durchschlag-Test	Sonderversuch	4.9	(X) ¹⁾	X	(X) ¹⁾

¹⁾ ggf. Erfordernis entsprechend Punkt 4.9.1

²⁾ DPTH = Dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln

Anlage 2: Übersicht – Einzuhaltende Grenzwerte für Dichtungsstoffe

Anforderung	Prüfverfahren/ Prüfwert (RPW)	Darstellung im Abschnitt	Einzuhaltende Grenzwerte		
			Ton	Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD)	Dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln
Durchlässigkeit	Durchlässigkeitsbeiwert k_{10}				
	• Dichtungsprobe	4.2	$\leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^{1)2)}$	$\leq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}^{1)3)}$	$\leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^{1)2)}$
	• Dichtungsprobe bei Dehnung	4.10	-	$\leq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}^{1)3)}$	-
	• Überlappungsbereich	4.11	-	$\leq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}^{1)3)}$	-
Festigkeit/ Scherfestigkeit	Undrainede Scherfestigkeit c_u	4.3	$\leq 50 \text{ kPa}$ (Trockeneinbau) 15 kPa 25 kPa (Unterwassereinbau)		-
Zerfalls- beständigkeit	Zerfallstest nach Endell (Zerfallsziffer nach 8h)	4.4	$\leq 0,05$ (und Beachtung Pinhole-Test)	-	-
Erosions- beständigkeit	Pinhole-Test (Lochvergrößerung nach Versuch)	4.5	$\leq 100\%$	-	$\leq 100\%$
	Ausspültest (Massenverlust)	4.7	-	-	$\leq 6\%$
	Turbulenztest (k_{10} nach Versuch)	4.8	-	$\leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^3)$	-
Verformbarkeit/ Flexibilität	Balkenbiegetest (Risstiefe im Dichtungsmaterial)	4.6	$\leq 1/3$ der Balkenhöhe	-	$\leq 1/3$ der Balkenhöhe
Festigkeit/ Durchschlag- widerstand	Durchschlag-Test (k_{10} nach Versuch)	4.9	-	$\leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^3)$	-
	Zugfestigkeit	4.1	-	$\geq 12 \text{ kN/m}$	-
	Verbundfestigkeit	4.1	-	$\geq 60 \text{ N/10 cm}$	-

¹⁾ Bei Proben, die aus der verlegten Dichtung entnommen wurden, darf der k -Wert maximal um den Faktor 10 erhöht sein.

²⁾ k_{10} – maßgebend für eine Schichtdicke von 20 cm

³⁾ k_{10} – maßgebend für eine Schichtdicke von 1 cm

Anlage 3: Übersicht – Im Rahmen des Nachweises der grundsätzlichen Eignung zu ermittelnde Materialkennwerte

	Naturtondichtung	Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD)	Dauerplastische Dichtung mit Ton und hydraulischen Bindemitteln
Materialkennwerte, im Rahmen des Nachweises der grundsätzlichen Eignung zu ermitteln	- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10} - natürlicher Wassergehalt w_n - Fließgrenze w_L - Kornverteilung - Kalkgehalt, Glühverlust - Proctordichte - undrännierte Scherfestigkeit c_u in Abhängigkeit vom Wassergehalt w_n - Flexibilität (Flexibilitätstest) - Festigkeit (Durchschlag-Test) - Erosionsbeständigkeit (Pinhole-Test) - Zerfallsbeständigkeit (Zerfallstest nach Endell) - qualitative mineralogische Analyse¹⁾	- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10} (in der Fläche, den Überlappungen und bei Dehnung) - Zugfestigkeit - flächenbezogene Masse - Wasseraufnahme - Verbundfestigkeit - Erosionsbeständigkeit (Turbulenztest) - Durchschlagfestigkeit (Durchschlag-Test) - Durchdrückwiderstand (Stempel-durchdrückversuch)²⁾ - Abriebbeständigkeit (nur bei Anwendung ohne Schutzschicht)	- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10} - undrännierte Scherfestigkeit c_u in Abhängigkeit vom Wassergehalt w_n - Flexibilität (Flexibilitätstest) - Festigkeit (Durchschlag-Test) - Erosionsstabilität (Pinhole-Test und Ausspültest) - Ausbreitmaß

¹⁾ erforderlich bei Erschließung neuer Tonvorkommen oder geänderten Abbaubedingungen

²⁾ erforderlich nur bei entsprechenden Randbedingungen

Anlage 4: Musterzertifikat für die Bestätigung über den Nachweis der grundsätzlichen Eignung eines Verfahrens zum maschinellen Einbau von Weichdichtungen in Bundeswasserstraßen



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BESTÄTIGUNG

über den
Nachweis der grundsätzlichen Eignung eines Verfahrens
(Grundprüfung gemäß ZTV-W, LB 210)
zum maschinellen Unterwasser-Einbau von
Dichtungen aus aufbereitetem Naturton
in Bundeswasserstraßen

Ausführende Firma: ...
...
...

Bewertungsgrundlage: Grundsätzliche Eignung wird aufgrund der durch die BAW begleitete Grundprüfung bestätigt.

Die o. g. Firma hat die grundsätzliche Eignung des nachfolgend genannten Verfahrens zum Toneinbau in Bundeswasserstraßen unter den aufgeführten Randbedingungen und Einschränkungen nachgewiesen.

Einbauverfahren: ...
Baustoff: ...
Einbaugerät: ...
Einbaurandbedingungen: ...
Einbaueinschränkungen: ...

Weitere Einzelheiten und Randbedingungen des Einbauverfahrens sind in dokumentiert.

Gültig bis: ...
Erstellt von: Abteilung: Geotechnik
Referat: Erdbau und Uferschutz (G4)

Karlsruhe, den ...
Im Auftrag

(...)